

LA BARRERA DE LA VELOCIDAD DE LA LUZ

APROVECHAMIENTO DEL CAOS

DIETA Y EVOLUCION DE LOS PRIMATES

Edición española de
SCIENTIFIC AMERICAN

GALAXIAS VECINAS

OCTUBRE 1993
700 PTAS.

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa



Octubre de 1993 Número 205



SECCIONES

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

J. Vilardell: *Destrucción de las ojivas nucleares*; Ramón Pascual: *¿Más rápido que la luz?*; Esteban Santiago: *Anergia de las celulas* T; Mónica Murphy: *Un universo de color*; Luis Bou: *Dominar el caos*; Joandomènec Ros: *Dieta y evolución de los primates*; Eugenio Portela: *El gran escándalo del radio*; J. Vilardell: *Hace...* y *Taller y laboratorio*; Shigeko Suzuki: *De cerca*; Luis Bou: *Juegos matemáticos*

Ciencia y sociedad:

Antonio Ten, Juan P. Adrados y Ana María Rubio

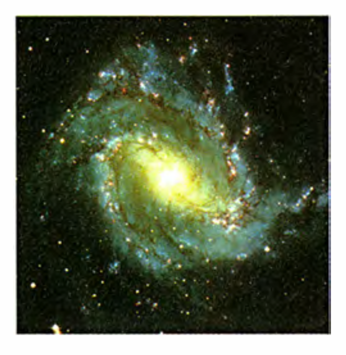
Ciencia y empresa:

Manuel Puigcerver

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Portada: David F. Malin

Página	Fuente
9	Sygma
10	Johnny Johnson
11-13	Jared Schneidman/JSD
15	Bettmann Archive
16-17	Patricia J. Wynne
18-22	Boris Starosta
25	Robert Becker/Custom Medical Stock
26-30	Dimitry Schidlovsky
42-47	David F. Malin
48	Pamela O. Lama, U. S. Naval Surface Warfare Center
49	Chris Usher/Black Star
50-51	Michael Goodman
52-53	Louis M. Pecora
54	Michael Goodman
56	Patricia J. Wynne
57	Steve Robinson/ Natural History Photographic Agency
58-61	Patricia J. Wynne
62	Natural History Photographic Agency (*izquierda*), Richard K. LaVal/ Animals Animals (*derecha*)
63	Jason Goltz
64-65	Roger M. Macklis
66	Con autorización del *Journal of the American Medical Association*
67-69	Roger M. Macklis
71	Lourdes Miralles
72-76	Juan José Pueyo
77	(*arriba*) Javier García Veigas, (*abajo*) Carlos de las Cuevas
82-84	Andrew Chistie
86-89	Documents Pour le Science



La fotografía de la portada muestra la galaxia espiral M83. La sutileza de los detalles y los delicados matices que se observan dan fe de la capacidad de la astrofotografía en color (véase "Un universo de color", por David F. Malin, en este mismo número). La luz azulada que tiñe los brazos espirales de la galaxia emana de estrellas jóvenes. Las bandas de polvo y gas de color amarillo-marrón engendran regiones de formación estelar, que brillan con un color rosáceo allí donde las estrellas recientes excitan los átomos de hidrógeno. Una nube de estrellas maduras, amarillentas, envuelve las regiones centrales.

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
EDICIONES José María Valderas, *director*
Juan Pedro Campos
ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal, *directora*
PRODUCCIÓN César Redondo Zayas
M.ª Cruz Iglesias Capón
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona (ESPAÑA)
Teléfono (93) 414 33 44 Telefax (93) 414 54 13

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR Jonathan Piel
BOARD OF EDITORS Alan Hall, *Executive Editor*; Michelle Press, *Managing Editor*; John Rennie, Russell Ruthen, *Associate Editors*; Timothy M. Beardsley; W. Wayt Gibbs; John Horgan; Marguerite Holloway; *Senior Writer*; Philip Morrison, *Book Editor*; Corey S. Powell; Philip E. Ross; Ricki L. Rusting; Gary Stix; Paul Wallich; Philip M. Yam.
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER John J. Hanley
CHAIRMAN OF THE BOARD Dr. Pierre Gerckens
CHAIRMAN EMERITUS Gerard Piel

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono (93) 414 33 44
Fax (93) 414 54 13

Precios de suscripción, en pesetas:

	Un año	Dos años
España	7.700	14.000
Extranjero	8.400	15.400

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 700 pesetas
Extraordinario: 900 pesetas

—Todos los precios indicados incluyen el IVA, cuando es aplicable.

— En Canarias, Ceuta y Melilla los precios incluyen el transporte aéreo.

— El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

MIDESA
Carretera de Irún, km. 13,350
(Variante de Fuencarral)
28049 Madrid Tel. (91) 662 10 00

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona
Teléfono (93) 414 33 44

PUBLICIDAD

Gustavo Martínez Ovín
Menorca, 8, bajo, centro, izquierda.
28009 Madrid
Tel. (91) 409 70 45 – Fax (91) 409 70 46

Cataluña y Baleares:
Miguel Munill
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Tel. (93) 321 21 14
Fax (93) 414 54 13



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 - 76

Fotocomposición: Tecfa. Línea Fotocomposición, S.A. Almogàvers, 189 - 08018 Barcelona
Fotocromos reproducidos por Scan V2, S.A., Avda. Carrilet, 237 - 08907 l'Hospitalet (Barcelona)
Imprime Rotographik, S.A. Ctra. de Caldes, km 3,7 - Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

Hace...

... cincuenta años

SCIENTIFIC AMERICAN: «Durante muchos años se creyó que aislar una proteína químicamente pura era casi imposible. Sin embargo, hace muy poco, la situación ha cambiado de raíz. La pepsina, la tripsina y la ureasa, enzimas, y la insulina, una hormona, han sido aisladas, y son proteínas. Uno de los episodios más brillantes en esta búsqueda de la proteína químicamente pura es el aislamiento del virus del mosaico del tabaco, que ha sido descrito como proteína cristalina. La importancia de este descubrimiento reside no sólo en que supone un gran progreso en el conocimiento de las estructuras proteínicas, sino también en que conecta las proteínas con diversas enfermedades como el sarampión, la fiebre amarilla y el resfriado común.»

«Los motores eléctricos de corriente alterna poseen únicamente unas cuantas velocidades fijas, que dependen de su construcción y de la frecuencia de la corriente de alimentación. La industria demanda la flexibilidad de los motores de corriente continua y la eficaz transmisión de los equipos de corriente alterna. La electrónica ya lo hace posible. Para ello se emplean tubos tiratrones, o sea, rectificadores gaseosos, o rellenos de vapor de mercurio, que convierten la corriente alterna en continua. La porción del semiciclo positivo durante la cual pasa corriente por el tubo puede variarse sin más que cambiar las tensiones de rejilla con respecto a la fase de las tensiones alternas establecidas entre la rejilla y el ánodo.»

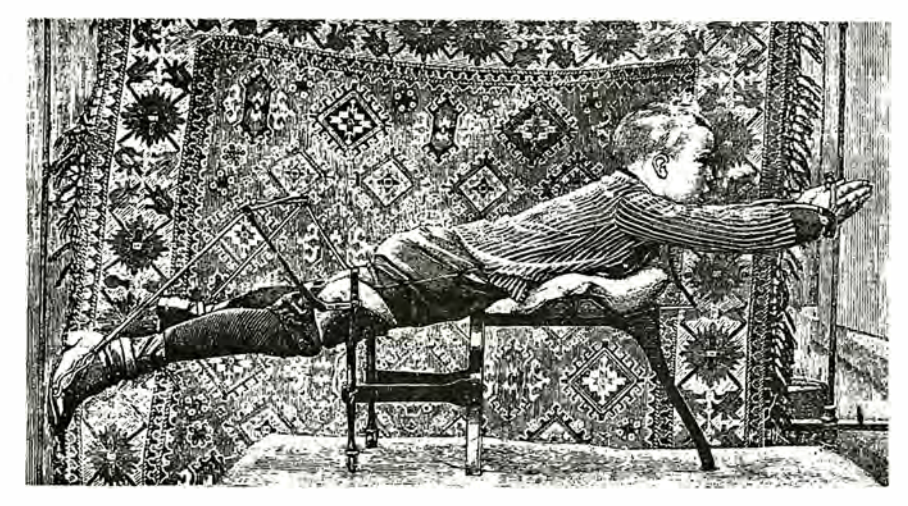
«Cuando se aluminiza una superficie óptica de vidrio, las moléculas evaporadas, al encontrarse en un vacío muy elevado, viajan, sin chocar con otras moléculas, desde la fuente de metal caliente hasta la superficie fría del vidrio, en la que se depositan formando una película metálica no cristalina con el mismo grado de pulimento que el vidrio. Tan pronto se permite el acceso del aire, el aluminio metálico empieza a oxidarse, y este óxido sigue espesándose durante unos 60 días. ¿Por qué no podría lograrse todo esto en un disco de aluminio fundido común que se dejase oxidar al aire? Fred B. Ferson, aficionado a la construcción de telescopios, de Biloxi (Mississippi), lo expone así: “El aluminio es un metal que absorbe gases fácilmente y resulta muy difícil impedir que capte impurezas durante su fundición. Además, las piezas moldeadas, al enfriarse, adquieren una estructura cristalina cuyos cristales engordan y se llenan de oclusiones, posiblemente debidas a la salida de los gases absorbidos.”»

... cien años

SCIENTIFIC AMERICAN: «No parece ahora improbable que, cuando el poder de la mente evoca una imagen, se ejerza una acción refleja a distancia, no importa cuán débil, sobre ciertos extremos de los nervios ópticos y, por tanto, sobre la retina. Helmholtz ha demostrado que los fondos de los ojos son de por sí luminosos, y logró ver, en una oscuridad total, el movimiento de su brazo gracias a la luz de sus propios ojos. Es éste uno de los experimentos más notables registrados en la historia de la ciencia, y es muy posible que sean pocos los hombres capaces de repetirlo satisfactoriamente, pues lo más probable es que la luminosidad de los ojos esté asociada a una actividad cerebral desusada y a un gran poder imaginativo. Es la fluorescencia del funcionamiento del cerebro, por así decirlo. *—Nikola Tesla, en una ponencia leída ante el Instituto Franklin.*»

«Los niños japoneses son amamantados hasta los seis años de edad, y puede oírseles solicitar el manantial lácteo en un lenguaje inconfundible. A la vista del uso casi universal de la leche de vaca en otros países, su exclusión de la dieta de los japoneses plantea el interesante tema de investigación de si la raza se beneficia o no de ese hábito. El doctor A. S. Ashmead, de Nueva York, analiza la cuestión en la revista médica *Sei-i-Kwai.* Parte para empezar de que, indirectamente, la ausencia de leche de vaca es de lo más beneficioso. La madre japonesa se siente obligada a cuidar de su salud y su dieta, y vive principalmente de arroz, “pescado, marisco, algas y otros productos del mar,” mientras que el vino y la cerveza los tiene rigurosamente proscritos. La recompensa a todo ese meritorio cuidado de la maternidad y la infancia es que el raquitismo no existe en absoluto. Sostiene el autor, además, que la exclusión de la leche de vaca de la dieta infantil evita la transmisión de la tuberculosis.»

«Se intenta que los niños aprendan a nadar sujetándolos en el agua y obligándolos a realizar los movimientos propios de la natación. Pero ello tiene un inconveniente: se necesita un profesor por alumno y, en una clase de muchos niños, el profesor no puede dedicar demasiado tiempo a cada uno de ellos. Mr. Devot ha sabido vencer las dificultades del anterior método de una manera muy ingeniosa. Su aparato (*véase abajo*) permite al alumno aprender en unas condiciones por completo iguales a las que se presentan cuando intenta mantenerse él solo en el agua. Emplean el aparato los alumnos del Liceo Michelet, quienes han sido los primeros en beneficiarse del invento de su maestro, Mr. Devot. *—La Nature.*»



Aparato para enseñar a nadar

Destrucción de las ojivas nucleares

De aquí a diez años se desactivarán más de 50.000 armas nucleares. Su destrucción requiere que se tomen nuevas decisiones políticas y se produzcan innovaciones técnicas

Frank von Hippel, Marvin Miller, Harold Feiveson, Anatoli Diakov y Frans Berkhout

Los Estados Unidos y la antigua Unión Soviética han acometido una drástica reducción de sus arsenales. A largo plazo, la destrucción de decenas de millares de armas nucleares relajará la amenaza de guerra nuclear. Pero a corto plazo, la situación de caos que reina en la ex Unión Soviética plantea el peligro de que esas armas, o materiales procedentes de ellas, pudieran llegar a manos peligrosas.

Unas 35.000 ojivas nucleares se hallan dispersas por cuatro de los estados nacidos a raíz de la desintegración de la Unión Soviética a fines de 1991: Rusia, Ucrania, Kazajstán y Bielorrusia. Dentro de Rusia, que heredó la mayor parte del arsenal, persiste la lucha política. No cejan tampoco las desavenencias entre Rusia y Ucrania.

Algo se ha avanzado en la puesta a buen recaudo de los excedentes de ojivas. Se ha informado que todas las ojivas tácticas soviéticas que estuvieron desplegadas en las catorce repúblicas no rusas y la mayoría de las instaladas en Rusia han sido retiradas a depósitos dentro de ésta, con lo que se ha reducido mucho el riesgo de empleo ilícito.

Además, los acuerdos START I y START II (firmados, respectivamente, en julio de 1991 y enero de 1993) obligan a la que fuera Unión Soviética y a EE.UU. a reducir sus arsenales estratégicos desde las 10.000 cabezas que almacenan cada uno hasta menos de 3500 por nación antes del año 2003. A tenor del START I, Ucrania, Kazajstán y Bielorrusia han convenido en devolver a Rusia, para su desguace, las 3000 ojivas nucleares estratégicas que quedan en sus territorios y adherirse al Tratado de No Proliferación como estados no nucleares. Bielorrusia ha ratificado los dos tratados, pero Kazajstán ha ratificado sólo el START I y Ucrania no ha ratificado ni uno ni otro. Por otra parte, en Rusia los partidarios de una línea dura podrían oponerse a la ratificación del START II, pues éste eliminaría los misiles de ojivas múltiples rusos, mientras que dejaría casi intactas las fuerzas estadounidenses de submarinos y bombarderos.

Aun cuando se ratificaran esos tratados, quedaría el problema de ponerlos en práctica. En Rusia, la agitada situación política ha sometido a gran tensión a su complejo nuclear. En diciembre de 1992, el director de la planta de regeneración de combustible nuclear de Cheliabinsk, donde se almacenan más de 25 toneladas de plutonio separado, se quejaba de que sus trabajadores no cobraban hacía más de dos meses. Ese mismo año, se les había dicho ya a los técnicos de los laboratorios de proyectos nucleares rusos que plantaran patatas si querían asegurarse la manutención.

El transportar decenas de toneladas de armas nucleares desactivadas hasta sus lugares de almacenamiento, desguazarlas y deshacerse sin peligro de su uranio y su plutonio será una labor delicadísima. No hay informes confirmados de que se hayan desviado ojivas ni materiales soviéticos, pero es imperativo que se acuerden medidas que permitan la supervisión y ayuda de Occidente.

Ese temor no se da por lo que respecta a la seguridad del proceso de eliminación de las ojivas norteamericanas. Pero el buen sentido político demanda reciprocidad en la supervisión. El Senado de EE.UU. ya lo reconoció cuando ratificó el START I en octubre de 1992 y encargó al presidente que buscara un acuerdo acerca de inspecciones recíprocas y otros procedimientos para vigilar el número de armas nucleares existentes en las reservas de EE.UU. y de la ex Unión Soviética. El gobierno ruso ha señalado que aceptaría esa supervisión recíproca, pero hasta ahora EE.UU. se ha limitado a negociar la supervisión unilateral de algunos aspectos de la destrucción de las ojivas rusas.

Debe replantearse ese enfoque. El progreso logrado hasta la fecha ha sido resultado de la buena voluntad estadounidense en aceptar concesiones recíprocas, tal como la de equiparar iniciativas "unilaterales" anunciada en 1991 por el presidente George Bush y el jefe soviético Mijail S. Gorbachov, para desactivar la mayoría de las ojivas tácticas soviéticas y norteamericanas.

Aunque los START I y II aumentarán la magnitud del problema, Rusia y EE.UU. ya están desguazando ojivas nucleares; de 1000 a 2000 unidades por año en cada país.

No es fácil desarmar una ojiva termonuclear. La mayoría de las ojivas

FRANK von HIPPEL, MARVIN MILLER, HAROLD FEIVESON, ANATOLI DIAKOV y FRANS BERKHOUT colaboran en asuntos relativos al desarme. Durante los últimos cinco años, von Hippel, físico y profesor de política internacional en la Universidad de Princeton, ha dirigido un programa sobre control de ojivas y material nuclear. Miller, profesor de ingeniería nuclear en el Instituto de Tecnología de Massachusetts, asesora al gobierno norteamericano en la política de no proliferación. Feiveson dirige *Science & Global Security*. Diakov preside el centro de control de armas, energía y estudios ambientales del Instituto de Física y Tecnología de Moscú. Berkhout, del Centro de Estudios Energéticos y Medioambientales de Princeton, es experto en regeneración del combustible nuclear procedente de reactores civiles y el reciclado del plutonio.



1. CARGA EN UN CAMION de una ojiva nuclear táctica procedente de la ex Unión Soviética para su transporte de Ucrania a Rusia, nación esta segunda donde sería almacenada. La retirada del servicio, en 1992, de las ojivas tácticas alivió las tensiones nucleares, pero ahora EE.UU. y los estados desmembrados de la antigua Unión Soviética tendrán que decidir qué hacer con decenas de millares de ojivas como ésta.

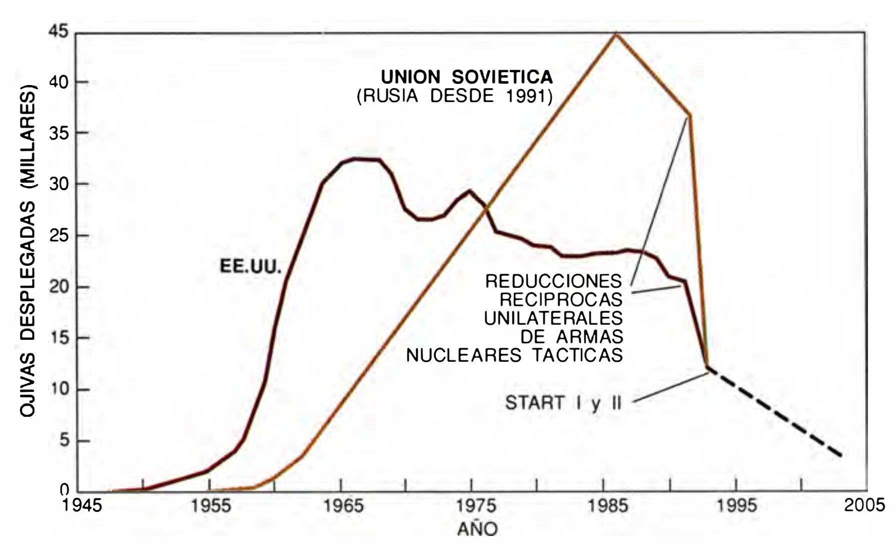


2. LAS OJIVAS SOVIETICAS se hallan desperdigadas en los territorios de cuatro estados independizados. En Ucrania, Kazajstán y Bielorrusia quedan más de 3000, pero deberían ser enviadas a Rusia para su destrucción. Actualmente las ojivas se desguazan en cuatro lugares de Rusia. Hay negociaciones en curso para diluir en uranio natural al menos 500 toneladas del uranio altamente enriquecido resultante y venderlo a EE.UU., donde serviría de combustible de reactores. El plutonio apto para uso militar se continúa separando del combustible agotado de reactores en instalaciones cercanas a Tomsk y Krasnoiarsk. Una tercera planta, próxima a Cheliabinsk, ha separado del combustible de reactores nucleares más de 25 toneladas de plutonio de uso civil desde 1978.

estratégicas se componen de un explosivo (de fisión) "primario" y de un "secundario" (de fusión) termonuclear, que es detonado por la explosión del primario. En el "nicho", hueco y esférico, del primario se encierra el plutonio de la ojiva, de tres a cuatro kilogramos por término medio, a veces con algo de uranio altamente enriquecido (UAE, con un contenido superior al 90 por ciento de uranio 235, isótopo capaz de reaccionar en cadena). Por lo general, el secundario contiene también UAE, unos 15 kilogramos por término medio. En resumidas cuentas, las ojivas norteamericanas sobrantes contienen unas 15 toneladas de plutonio y hasta 400 toneladas de UAE. Por su parte, el excedente soviético de ojivas, incluidas las 10.000 ya desguazadas, contiene unas 100 toneladas de plutonio y más de 500 toneladas de UAE.

Para desguazar una ojiva, se empieza por extraer el primario y el secundario de la carcasa del proyectil; se separan luego los explosivos químicos que circundan el nicho. Por último, se recupera el plutonio y el UAE para su reutilización o almacenamiento. La planta norteamericana de desguace, Pantex, se halla cerca de Amarillo (Texas). Los secundarios se envían a la planta Y-12 de Oak Ridge (Tennessee), donde se recupera y almacena el uranio. Ambas instalaciones pertenecen al Departamento de Energía.

Hasta 1989, en EE.UU. los nichos



3. CAIDA EN PICADO de los arsenales de las superpotencias desde 1991, cuando George Bush y Mijail Gorbachov anunciaron que la mayor parte de las ojivas nucleares tácticas de sus países volverían al almacén. Según los tratados vigentes, cada país debe reducir su despliegue de armas nucleares hasta un número comprendido entre 3000 y 3500 para el año 2003. Rusia y EE.UU. retendrán en despliegue un total de unas 5000 ojivas tácticas y estratégicas. No obstante, los acuerdos que imponen tales reducciones no estipulan el destino de las ojivas que se pongan fuera de servicio ni el del uranio y el plutonio que contienen.

iban a parar a la planta de Rocky Flats, junto a Denver, donde se recuperaba y purificaba el plutonio para reutilizarlo. Pero la fábrica se cerró por problemas ambientales y de seguridad, y todavía hay que construir su sustituta. En el ínterin, los nichos se guardan en Pantex, en recipientes herméticos dentro de búnkeres fuertemente protegidos a los que llaman iglúes. Hay unos sesenta de éstos; puede albergar cada uno hasta 400 nichos, cifra suficiente para acoger todas las ojivas norteamericanas que deben retirarse del servicio.

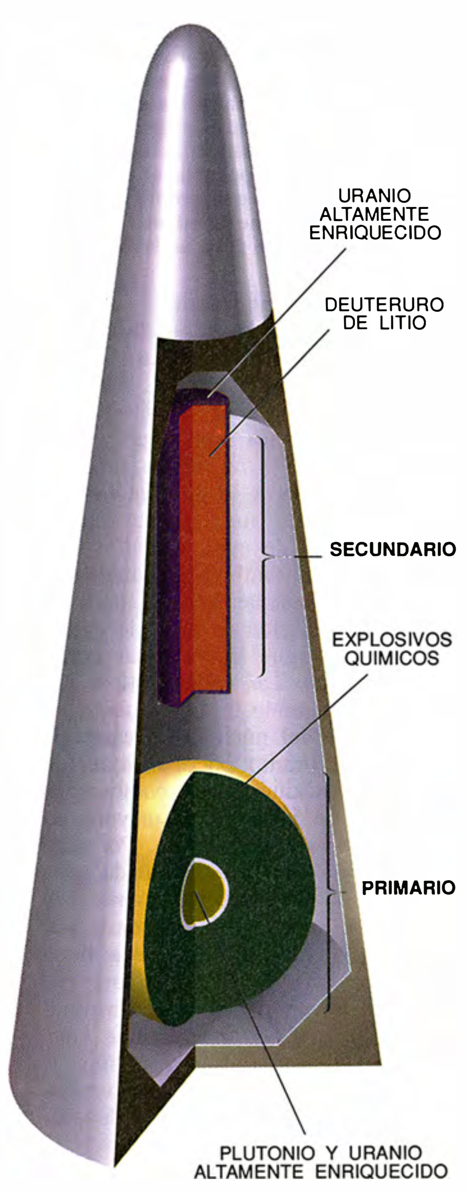
En Rusia, las ojivas se están desguazando en cuatro instalaciones con una capacidad conjunta de 6000 unidades por año, según informes. El Ministerio de Energía Atómica ruso ha solicitado la ayuda estadounidense para construir un depósito central seguro, con capacidad para 40.000 contenedores, donde almacenar componentes o material de cabezas nucleares, en las proximidades de la ciudad siberiana de Omsk, uno de los centros rusos de producción de plutonio. El gobierno municipal de Tomsk se opone al proyecto, temeroso de los riesgos potenciales ligados al plutonio. La propuesta fue oficialmente "aplazada" después de que una explosión destruyera, en el abril pasado, parte de la cercana planta de regeneración Tomsk-7.

Cualquiera que sea la decisión final acerca de esta instalación, tanto para Rusia como para EE.UU. la tarea inmediata más crítica es la de buscar un almacenamiento seguro de los materiales nucleares, depósito que debería protegerlos hasta su procesamiento en una forma que haga más difícil la proliferación.

El procedimiento obvio para la inutilización del uranio enriquecido de cara a la fabricación de armas consiste en mezclarlo con grandes cantidades de su isótopo no reactivo en cadena, o uranio 238, que constituye el 99,3 por ciento del uranio natural. La reconstitución de la fracción enriquecida requiere técnicas de separación isotópica que dominan muy pocos países. Si el UAE se diluye hasta que sólo contenga aproximadamente un 4 por ciento de uranio 235, el uranio "poco enriquecido" resultante puede emplearse como combustible en los reactores nucleares enfriados con agua ligera.

El gobierno de EE.UU., siguiendo una sugerencia de Thomas Neff, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, ha acordado pagar unos 10.000 millones de dólares por el uranio poco enriquecido proveniente de unas 500 toneladas de uranio de calidad militar recuperado del excedente de ojivas soviéticas. Esta cantidad podría alimentar una octava parte de la capacidad nuclear mundial durante el período de 20 años que abarca el contrato. De acuerdo con lo previsto, los rusos diluirán el UAE en una planta cercana a Ekaterimburgo (antes Sverdlovsk) y lo remitirán luego a Estados Unidos.

Es probable que unas 400 del medio millar de toneladas de uranio militar existentes en las reservas norteamericanas se conviertan también en excedentes. Unas cuantas toneladas por año se emplearán como combustible en buques de guerra, así como en reactores dedicados a la investigación o a la obtención de isótopos. Las restantes habrá que diluirlas hasta niveles de poco enriquecimiento lo antes posible, y almacenarlas, para acaso venderlas como combustible de reactores de centrales eléctricas. Esta operación reduciría el coste de salvaguardar el material y, además, tranquilizaría a Rusia y a otros países acerca de la irreversibilidad de la merma del armamento norteamericano.



4. UNA OJIVA NUCLEAR consta de un "primario" de fisión y un "secundario" de fusión-fisión. En el desguace, primero se separan los explosivos químicos y, seguidamente, se extraen, para procesarlos, el plutonio del primario y el plutonio muy enriquecido del secundario.

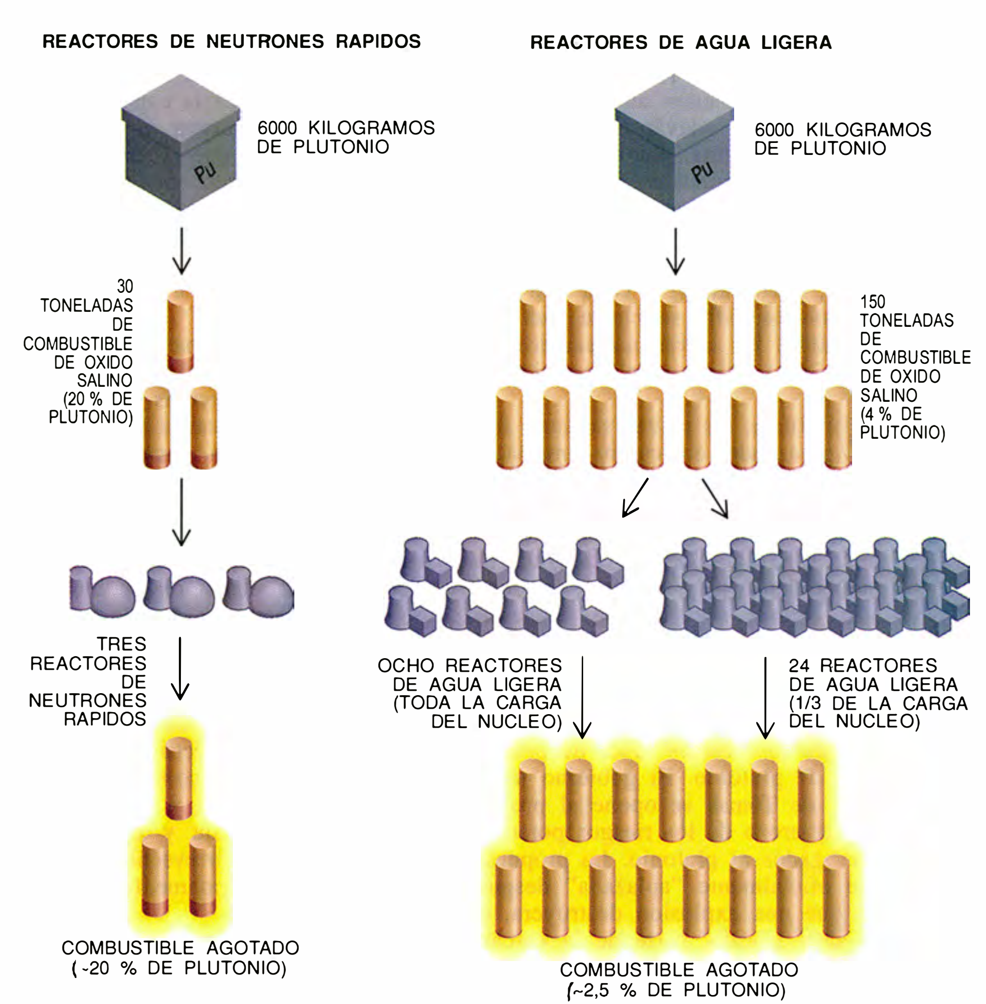
El plutonio no admite la desnaturalización isotópica aplicada al uranio. De ahí que planteen un problema más espinoso las 150 toneladas de plutonio sobrante que darán las ojivas desguazadas. Pero podemos dificultar grandemente su regeneración para ser reutilizado en armas si se mezcla con productos de fisión radiactivos; por ejemplo, mediante la sustitución del uranio 235 por plutonio militar en el combustible de mezcla de óxidos ("mixed-oxide fuel") que puede emplearse en los reactores comerciales de agua ligera. Tres años en el núcleo de un reactor rebajaría el contenido en plutonio del combustible en un 40 por ciento.

El plutonio que quedase en el combustible agotado contendría una fracción mayor de isótopos distintos del 239 (el preferido para ojivas), por lo que sería menos atractivo en cuanto material de uso militar. Con todo, ese plutonio de reactor aún podría ser separado y empleado para construir bombas sencillas con unos rendimientos del orden de las mil toneladas de alto explosivo.

Japón y algunos países europeos occidentales ya han preparado una infraestructura parcial destinada a reciclar el plutonio recuperado del combustible de reactores nucleares consumido; parece, pues, una posibilidad atractiva que se añadiera a este sistema plutonio militar. Por desgracia, a las compañías eléctricas de estos países no les interesa la opción. El coste de manufactura del combustible de mezcla de óxidos es considerablemente superior al del uranio poco enriquecido, y, en cualquier caso, esos países prevén unos excedentes importantes de plutonio civil.

Además, la seguridad del combustible de óxido salino, o de mezcla de óxidos, suscita graves inquietudes, puesto que el material recién

5. LA RETIRADA DEL PLUTONIO es un problema sin resolver. Se han propuesto dos soluciones. La primera consiste en emplearlo como combustible de reactores nucleares, irradiarlo y disminuir su utilidad militar. La segunda, más segura y económica, incorporaría el metal en "troncos" de vidrio que pronto se fabricarán para el almacenamiento de residuos radiactivos de gran actividad.



fabricado contiene plutonio en una forma fácilmente separable, sin acompañamiento de productos de fisión. Ello hizo que EE.UU. rechazara, hace más de diez años, el reciclado del plutonio comercial y que, en consecuencia, no tenga ninguna planta dedicada a la fabricación de combustible de mezcla de óxidos para reactores de agua ligera.

Rusia carece también de plantas de ese tipo. Y aunque así no fuera, el ritmo de irradiación de plutonio en los reactores de agua ligera rusos resultaría lentísimo. Las características nucleares del plutonio limitan a alrededor de un tercio del núcleo del reactor la fracción de uranio poco enriquecido que puede sustituirse por combustible de mezcla de óxidos en la mayoría de los reactores de agua ligera. Por consiguiente, un reactor eléctrico de agua ligera de 1000 megawatts podría procesar sólo unos 300 kilogramos por año de plutonio militar. Rusia tiene en funcionamiento siete reactores de esa clase, y un octavo casi terminado, por lo que podría irradiar unas 2,5 toneladas de plutonio al año. A ese ritmo, se tardaría cuarenta años en irradiar las 100 toneladas de plutonio militar sobrante en Rusia.

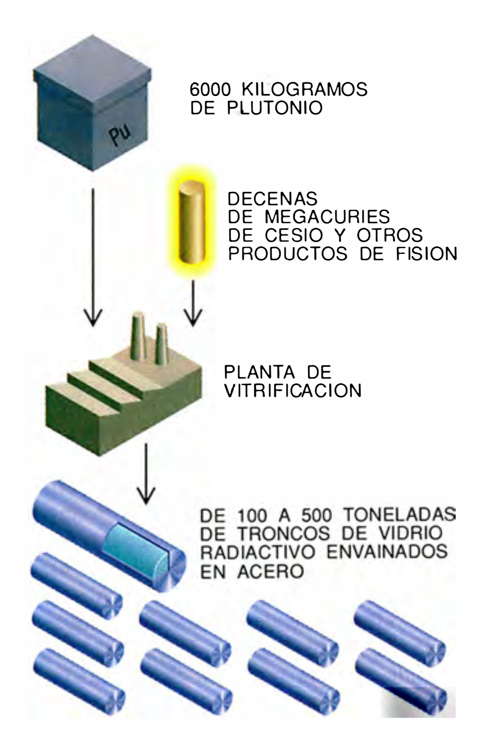
Los riesgos podrían reducirse si se construyesen, en un único emplazamiento de alta seguridad por país, reactores cuyo diseño les permitiese aceptar núcleos completos de combustible de mezcla de óxidos. Para este fin se han propuesto reactores de tipos diversos. El que probablemente podría construirse con mayor rapidez es el de agua ligera que fabrica ABB Combustion Engineering, proyectado para que se adapte con facilidad a un núcleo que sólo contenga plutonio.

Entre los demás candidatos se cuentan el reactor de neutrones rápidos refrigerado por metal líquido y el reactor refrigerado por gas de alta temperatura, de los que hay versiones avanzadas en desarrollo en EE.UU. y otros países. A causa del mayor contenido en plutonio del combustible, los reactores de neutrones rápidos pueden irradiar más plutonio que los reactores de agua ligera de potencia equivalente. Desgraciadamente, sin reciclado, el plutonio del combustible agotado seguiría siendo de una calidad casi militar. Por contra, los reactores refrigerados por gas podrían irradiar el plutonio hasta casi destruirlo, y el residuo que quedara sería aún menos aprovechable para uso militar que el contenido en el combustible agotado de los reactores de agua ligera. Sin embargo, no tiene mucho sentido aspirar a una fisión prácticamente completa del plutonio militar mientras no haya planes encaminados a tratar del mismo modo las cantidades ingentes de plutonio civil (más de 1000 toneladas para finales de siglo) que se están acumulando en el combustible, sin regenerar, de los reactores productores de energía.

Habrá que avanzar y ensayar mucho antes de que los reactores refrigerados por metal líquido o por gas estén listos para su implantación. (Lo que aún es más cierto para otro procedimiento de destrucción del plutonio: irradiarlo con neutrones producidos en blancos bombardeados con protones acelerados hasta altas energías.) El costo sería de varios miles de millones de dólares y supondría una demora de diez años; y, luego, una vez comprobada la viabilidad de la técnica, habría que construir costosas plantas de producción.

Ante estas dificultades, los investigadores de EE.UU. y Rusia consideran otras soluciones que quizá podrían llevarse a la práctica con menos dinero y más rapidez. En particular, nosotros —entre otros— hemos examinado la viabilidad de neutralizar el plutonio junto con los residuos radiactivos. Hay instalaciones en ambos países, así como en Francia, Reino Unido y Bélgica, que eliminan residuos de regeneración de gran radiactividad incorporándolos a vidrio; éste se guarda luego en profundos depósitos geológicos. Aunque al desembarazarnos del plutonio junto con los residuos radiactivos desperdiciaríamos la electricidad que podría generar, la pérdida es insignificante desde una perspectiva más amplia. Con los precios actuales del uranio y el plutonio, éste no resultará económico como combustible al menos durante décadas. Además, cien o doscientas toneladas del metal podrían alimentar las actuales necesida-

MEZCLA DE PLUTONIO CON RESIDUOS DE GRAN RADIACTIVIDAD



des nucleares mundiales sólo durante una fracción de año.

Por consiguiente, debe darse prioridad a la amenaza para la seguridad que plantea este material. En una neutralización directa del plutonio intervendrían menos manipulaciones y menos transportes, y, por tanto, menos riesgos de desviación que en su uso como combustible.

En Aiken (Carolina del Sur) se ha construido una planta de vitrificación de residuos; está allí el complejo, hoy cerrado, de producción de plutonio militar de Savannah River. Se espera que, de 1994 a 2009, la fábrica produzca por lo menos 8000 toneladas de vidrio radiactivo en forma de enormes "troncos" revestidos de acero de tres metros de largo y 0,6 metros de diámetro, cada uno de los cuales contendrá del orden de media tonelada de pasta de residuos muy radiactivos mezclada con 1,2 toneladas de vidrio al borosilicato. En estos troncos podrían disolverse setenta toneladas de plutonio sin que la concentración se elevase por encima de los niveles propios del combustible agotado de los reactores productores de energía.

Se tardaría al menos cinco años en completar las estimaciones de seguridad y demás preparativos necesarios para incorporar plutonio militar al vidrio radiactivo en Savannah River, pero los expertos no ven dificultades técnicas insalvables. Como el vidrio se seguiría fabricando en cualquier caso, los costes adicionales serían los debidos al procesado previo del plutonio y a su introducción en el crisol, más los relativos a los dispositivos de protección y seguridad; unos costes probablemente menores que los de irradiar el plutonio en reactores de agua ligera.

Aunque la inserción del plutonio militar en vidrio radiactivo no le despojaría de su potencial uso militar, los productos de fisión altamente radiactivos harían que su recuperación a partir del tronco de vidrio fuese al menos tan difícil como a partir de combustible agotado. Ese plutonio sería inaccesible a grupos particulares, e incluso un país decidido a ello necesitaría tiempo y recursos para recuperarlo.

Otra posibilidad es formar troncos con el plutonio y sin residuos de gran radiactividad, sustituyendo éstos por elementos tales como el gadolinio, muy semejantes químicamente al plutonio y, por tanto, difíciles de separar de él. Esta mezcla del plutonio con su diluyente podría además "emborracharse" con cesio 137, un producto de fisión que es un intenso emisor gamma y cuyo período de semidesintegración dura 30 años.

Rusia está vitrificando residuos de gran radiactividad en sus instalaciones de regeneración próximas a Cheliabinsk. En sus depósitos hay más o menos la misma cantidad de residuos (medida en términos de radiactividad) que en Savannah River, pero el vidrio al fosfato que se emplea en Cheliabinsk no parece ser tan duradero, ni tan seguro, como el vidrio al borosilicato que se emplea en Europa Occidental, Japón y EE.UU., que debe sus virtudes a que el boro absorbe neutrones.

Si se transfiriera a Rusia la técnica de la vitrificación al borosilicato, el insertar el plutonio militar en vidrio no presentaría dificultades. Pero, por desgracia, las organizaciones nucleares rusas muestran escaso entusiasmo ante esa idea y, en general, ante cualquier posibilidad de procesar el plutonio a formas más refractarias a la desviación. Piensan que se trata de un patrimonio nacional. Pero si las autoridades rusas cobraran conciencia del monto de costos y riesgos, y además tuviesen la certeza de que es voluntad estadounidense la neutralización de su propio plutonio militar, podría convencerse a Rusia de que abandone su mortal tesoro. Suponiendo que EE.UU. y los antiguos estados soviéticos llegasen a un acuerdo acerca del excedente de ojivas, aún quedarían pendientes las comprobaciones. Los especialistas del Laboratorio Nacional de Los Alamos y de Pantex han llegado a la conclusión de que podría ejercerse la supervisión sin revelar ninguna información decisiva sobre la ingeniería de las ojivas nucleares. Pese a ello, el gobierno de EE.UU. insiste en una política unilateral, limitándose a los derechos de supervisión que le es posible negociar en conexión con la adquisición de uranio altamente enriquecido soviético y la asistencia en la construcción de instalaciones de almacenamiento para el armamento sobrante.

Nosotros defendemos la supervisión bilateral, de EE.UU. y Rusia, durante la etapa de desguace de las ojivas, y que el uranio y el plutonio deberían ponerse bajo salvaguarda internacional una vez procesados y eliminada toda información acerca del diseño de las armas. La Agencia Internacional para la Energía Atómica se ha ofrecido para supervisar el almacenamiento y la aplicación o destrucción de los materiales de las ojivas.

Los dirigentes rusos han mostrado su conformidad con una supervisión global de ese tenor, basada en la reciprocidad. No está claro cuánto tiempo permanecerá abierta esta oportunidad. Los EE.UU. deberían moverse rápidamente y ofrecer a Rusia el derecho recíproco de supervisar la destrucción de sus ojivas. Tales medidas deben fortalecerse mediante un régimen de no proliferación que liquide, a escala mundial, la producción de materiales para armamento, y no sólo en EE.UU. y la antigua Unión Soviética.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

REVERSING THE ARMS RACE: HOW TO ACHIEVE AND VERIFY DEEP REDUCTIONS IN THE NUCLEAR ARSENALS. Dirigido por Frank von Hippel y Roald Z. Sagdeev. Gordon and Breach Publishers, 1990.

DISPOSITION OF SEPARATED PLUTONIUM. Frans Berkhout, Anatoli Diakov, Harold Feiveson, Helen Hunt, Edwin Lyman, Marvin Miller y Frank von Hippel en *Science & Global Security*, vol. 3, n.os 3-4, páginas 161-214, marzo de 1993.

ON THE APPLICATION OF IAEA SAFEGUARDS TO PLUTONIUM AND HIGHLY ENRICHED URANIUM FROM MILITARY INVENTORIES. Thomas E. Shea en *Science & Global Security*, vol. 3, n.os 3-4, páginas 223-236, marzo de 1993.

RUSSIAN/SOVIET NUCLEAR WARHEAD PRODUCTION. Thomas B. Cochran y Robert S. Norris. Natural Resources Defense Council, 1993.

¿Más veloz que la luz?

Los experimentos de óptica cuántica indican que dos sucesos alejados pueden influirse mutuamente más deprisa que señal alguna que se transmitiese entre ellos

Raymond Y. Chiao, Paul G. Kwiat y Aephraim M. Steinberg

A los experimentalistas que se dedican a la mecánica cuántica lo fantástico a menudo se les torna realidad. Así ha ocurrido en el estudio del fenómeno de la "no localidad", o "acción a distancia". La idea que bajo el mismo subyace pone en cuestión uno de los principios fundamentales de la física moderna: que nada viaja más deprisa que la luz.

Si una partícula desapareciese en una pared y reapareciese, casi instantáneamente, al otro lado, diríamos que dicha regla se habría violado. No vendrá mal una referencia a Lewis Carroll. Cuando Alicia pasa a través del espejo, su movimiento constituye en cierto sentido una acción a distancia, o un caso de no localidad: su paso sin esfuerzo por el objeto sólido es instantáneo. El comportamiento de la partícula no sería menos extraño; si calculásemos su velocidad media, encontraríamos que sería mayor que la de la luz.

¿Es ello posible? ¿Puede violarse impunemente una de las leyes más afamadas de la física moderna? ¿Falla en algo nuestra concepción de la mecánica cuántica o nuestra idea de "velocidad de paso"? Para contestar tales preguntas, se han realizado últimamente numerosos experimentos ópticos que analizan algunas manifestaciones de la no localidad cuántica. Nos concentraremos particularmente en tres experimentos donde se muestran efectos no locales. En el primero, dos fotones "echan una carrera", y uno de ellos debe atravesar una "pared". En el segundo, al observar cómo transcurre la carrera, veremos que cada fotón corre a la vez por las dos calles. El tercero revela que el comportamiento simultáneo de los fotones gemelos está acoplado, y que sigue estándolo aun cuando la distancia que los separe no permita que señal alguna tenga tiempo de ir de uno a otro.

La distinción entre localidad y no localidad se halla vinculada a la noción de trayectoria. Una bola de croquet, por ejemplo, que rueda en el mundo clásico tiene, en cada momento, una posición definida. Si a cada instante se le tomase una fotografía y se juntasen luego los fotogramas, percibiríamos una línea suave y continua, una trayectoria, que iría desde la maza hasta el aro. En cada punto de esta trayectoria la bola de croquet tendría una velocidad definida, con su correspondiente energía cinética. Si recorriese una zona llana, llegaría a su objetivo sin más. Pero si subiese por una pendiente, su energía cinética se iría convirtiendo en energía potencial, con lo que perdería velocidad hasta pararse justo antes de empezar a retroceder cuesta abajo. En el argot de la física, a una pendiente así se le llama barrera porque la bola no tiene energía suficiente para saltarla y, desde un punto de vista clásico, tendrá siempre, al alcanzarla, que volver sobre sus pasos. Análogamente, unas bolas de croquet (o erizos, como dispuso Carroll) que Alicia lanzase contra una pared de ladrillo sin energía suficiente para romperla no podrían sino rebotar en ella.

En la mecánica cuántica este concepto de trayectoria se quiebra. La posición de una partícula mecanocuántica, al contrario que la de una bola de croquet, se describe mediante un paquete de ondas difuminado, y no con un punto matemático preciso. Podemos asociar el paquete al caparazón de una tortuga, ya que a partir de su extremo delantero asciende hasta cierta altura, desde donde disminuye hacia la parte trasera. La altura de la onda en una posición determinada indica la probabilidad de que la partícula esté allí: cuanto más alta sea una zona del paquete de ondas, más probable será que la partícula se encuentre en ella. La anchura del paquete, de un cabo al otro, representa la incertidumbre intrínseca de la localización de la partícula. Sin embargo, cuando se detecta la partícula en un punto, todo el paquete de ondas desaparece. La mecánica cuántica no nos dice dónde estaba la partícula antes de ese momento.

Esta incertidumbre en la localización conduce a una de las consecuencias más notables de la mecánica cuántica. Si los erizos fueran mecanocuánticos, la incertidumbre de su posición permitiría que tuviesen una posibilidad muy pequeña, aunque real, de aparecer por el otro lado de la pared. Este proceso, denominado efecto túnel, desempeña un papel importante en la ciencia y en la tecnología, con un peso capital en la fusión nuclear, en ciertos dispositivos electrónicos de alta velocidad, en los microscopios de máxima resolución y en algunas teorías cosmológicas.

A pesar del nombre, "túnel", la barrera permanece siempre intacta. Si una partícula estuviera dentro de la barrera, su energía cinética sería negativa. La velocidad es proporcional a la raíz cuadrada de la energía cinética, de manera que en el túnel habría que extraer la raíz cuadrada de un número negativo; es, por tanto, imposible asignar una velocidad real a la partícula dentro de la ba-

RAYMOND Y. CHIAO, PAUL G. KWIAT y AEPHRAIM M. STEINBERG estudian características fundamentales de la mecánica cuántica —la interferencia, la no localidad y el efecto túnel— mediante la óptica no lineal. Chiao se graduó en Princeton en 1961 y se doctoró por el MIT bajo la dirección de Charles Townes; desde 1967 es profesor de física en la Universidad de California en Berkeley. Kwiat es becario postdoctoral; se graduó por el MIT en 1987 y hace poco se doctoró bajo la dirección de Chiao. Steinberg se graduó en la Universidad de Yale en 1988. Es alumno de doctorado de Chiao.

rrera. Esta es la razón de que, cuando mira el reloj que le ha prestado el Conejo Blanco, el erizo que pasa al otro lado de la pared ponga, como desde los años treinta suelen hacer los físicos, cara de perplejidad. ¿Qué hora ve el erizo? En otras palabras, ¿cuánto tarda en atravesar la barrera?

A lo largo de los años se ha intentado muchas veces determinar cuánto tiempo dura la travesía por efecto túnel, pero no se ha obtenido nunca una solución universalmente aceptada. Con fotones por erizos, nuestro grupo ha llevado a cabo hace poco un experimento que proporciona una definición concreta de ese tiempo.

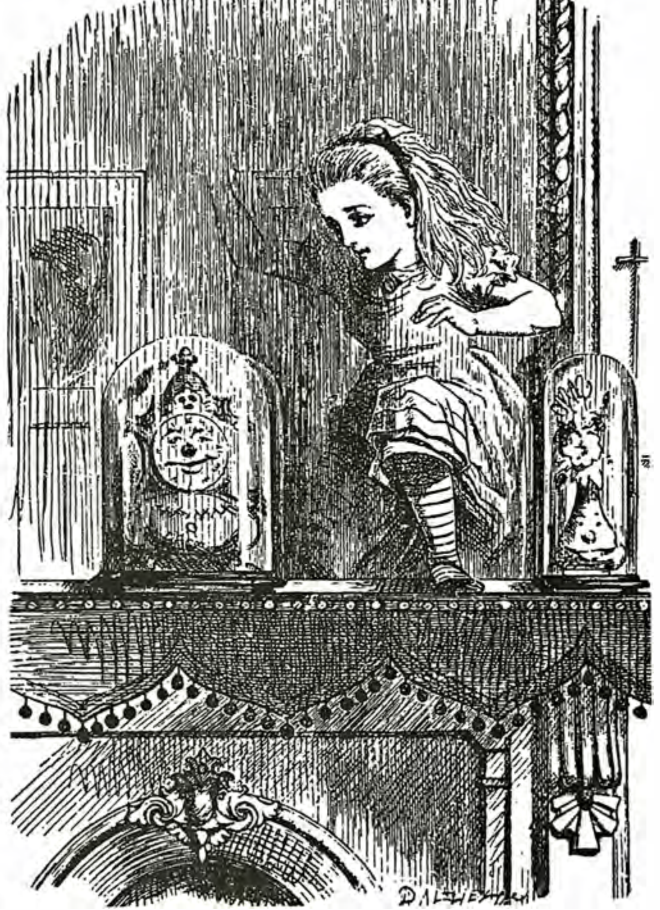
Los fotones son las partículas elementales que forman la luz; una bombilla corriente emite más de cien mil millones de ellos en una milmillonésima de segundo. Nuestro experimento no necesitaba tantos. Para nuestras medidas utilizamos una fuente luminosa que emitía un par de fotones simultáneamente. Cada fotón viajaba hacia un detector distinto. Se colocaba una barrera en la trayectoria de uno de los dos, y se dejaba que el otro volase sin obstáculos. La mayoría de las veces el primer fotón rebotaba en la barrera y se perdía; sólo se detectaba su gemelo. Sin embargo, el primer fotón pasaba ocasionalmente por efecto túnel a través de la barrera y entonces los dos fotones llegaban a sus respectivos detectores. En tal caso podíamos comparar los tiempos de llegada y descubrir así cuánto había durado la travesía por efecto túnel.

De barrera sirvió un elemento óptico usual: un espejo. No era, sin embargo, como los corrientes de las casas (que constan de un recubrimiento metálico y absorben hasta un 15 por ciento de la luz que reciben). Los espejos de laboratorio están formados por capas delgadas y alternantes de dos tipos de cristal transparente a través de los cuales la luz viaja a velocidades ligeramente distintas. Estas capas dan a modo de "empellones de velocidad" periódicos. Sueltas, harían poco más que frenar la luz. Pero cuando se forma con ellas un conjunto, adecuadamente espaciadas, dan lugar a una zona donde a la luz le es casi imposible pasar. Un recubrimiento multicapa de una micra de espesor, una centésima parte del diámetro del cabello humano, refleja el 99 por ciento de la luz incidente en caso de que la energía de los fotones (el color de la luz) sea aquella para la que el recubrimiento ha sido diseñado. Nuestro experimento se centró en el uno por ciento restante de fotones que por efecto túnel atraviesan el espejo.

Durante varios días de recogida de datos, más de un millón de fotones cruzaron la barrera, uno a uno. Comparamos los tiempos de llegada de esos fotones y los de aquellos que, sin estorbos en su camino, habían viajado a la velocidad de la luz. (Esta es tan grande que la electrónica convencional es cientos de miles de veces demasiado lenta para medir semejante tiempo; la técnica que usamos se describirá más adelante, como un segundo ejemplo de no localidad cuántica.)

Nos encontramos con un resultado sorprendente: en promedio, los foto-





1. POR "EFECTO TUNEL" ALICIA se mueve sin esfuerzo a través de un espejo de manera muy parecida a como hacen los fotones en los experimentos de óptica cuántica que se describen en este artículo. Sin ser de la profesión, diríase que Lewis Carroll anticipó un espinoso problema de la física del siglo XX, el del tiempo de tránsito por efecto túnel, cuando hizo que Sir John Tenniel le dibujara una extraña cara al reloj del otro lado del espejo.



2. EL CROQUET DEL OTRO LADO DEL ESPEJO: Alicia lanza erizos, que se parecen asombrosamente al joven Heisenberg, hacia una pared. Cumpliendo los imperativos de la física clásica, los erizos siempre rebotan. Pero, según la mecánica cuántica, existe una pequeña probabilidad de que un erizo aparezca al otro lado. Los físicos cuánticos se enfrentan a un quebradero de cabeza:

nes que habían experimentado el efecto túnel llegaban antes que los que habían ido por el aire, con una velocidad media en el túnel que era aproximadamente 1,7 veces la velocidad de la luz. Esta conclusión parece contradecir la idea clásica de la causalidad. Según la teoría de la relatividad de Einstein, ninguna señal puede viajar más deprisa que la velocidad de la luz; si las señales pudieran ir más deprisa, los efectos podrían preceder a las causas desde el punto de vista de determinados observadores. Por ejemplo, una bombilla podría empezar a brillar antes de que se diera al interruptor.

La situación puede plantearse con más precisión. Si en un instante determinado el lector toma la decisión de abrir un obturador para lanzar fotones hacia un espejo, y otra persona se sienta al otro lado de éste esperando la llegada de las partículas, ¿cuánto tiempo transcurrirá antes de que dicho observador sepa que usted ha abierto el obturador? Como el fotón viaja por efecto túnel a una velocidad mayor que la de la luz, en un principio podría parecer que el testigo vería la luz antes de que le pudiera llegar una señal que viajara a la velocidad límite teórica, en contra de la concepción einsteiniana de la causalidad. Tal estado de cosas sugiere toda una serie de extraordinarias, por no decir extravagantes, técnicas de comunicación. De hecho, las consecuencias que tendrían las interacciones más-rápidas-que-la-luz llevaron a algunos físicos de principios de siglo a proponer interpretaciones de la mecánica cuántica distintas de la usual.

¿Hay alguna forma mecanocuántica de salir de esta aporía? Sí, la hay, pero nos priva de la excitante posibilidad de jugar con causas y efectos. Hasta ahora hemos estado hablando de la velocidad de travesía por efecto túnel de los fotones en un contexto clásico, como si fuera una cantidad directamente observable. Sin embargo, el principio de incertidumbre de Heisenberg enseña que no lo es. El instante de emisión de un fotón no está definido con precisión, como tampoco lo están la localización o la velocidad exactas. Es más correcto describir la posición de un fotón mediante una distribución de probabilidad acampanada, o en forma de caparazón de tortuga, cuya anchura corresponde a la incertidumbre de su localización.

La metáfora puede de nuevo ayudarnos. El morro de cada tortuga cruza la línea de salida en el instante en que la bandera de salida se baja. La emergencia del morro señala el primer momento en que hay alguna posibilidad de observar el fotón. No se puede recibir ninguna señal antes de que llegue el morro. Pero debido a la incertidumbre de la localización del fotón, en promedio hay un corto retraso antes de que éste cruce la salida. La mayor parte de la tortuga (donde es más probable detectar el fotón) viaja detrás del morro.

Para simplificar, designemos "tortuga 1" a la distribución de probabilidad del fotón que viaja sin obstáculos hacia el detector y "tortuga 2" a la del que pasa por efecto túnel. Cuando la tortuga 2 alcanza la barrera, se desdobla en dos tortugas más pequeñas: una de ellas se refleja hacia el punto de partida, la otra cruza la barrera. Juntas, estas dos tortugas parciales representan la distribución de probabilidad de un único fotón. Cuando se detecta el fotón en una posición, su otra tortuga parcial desaparece instantáneamente. La tortuga reflejada es mayor que la tortuga del efecto túnel debido simplemente a que la posibilidad de reflexión es mayor que la de la transmisión (recuérdese que el espejo refleja un fotón el 99 por ciento de las veces).



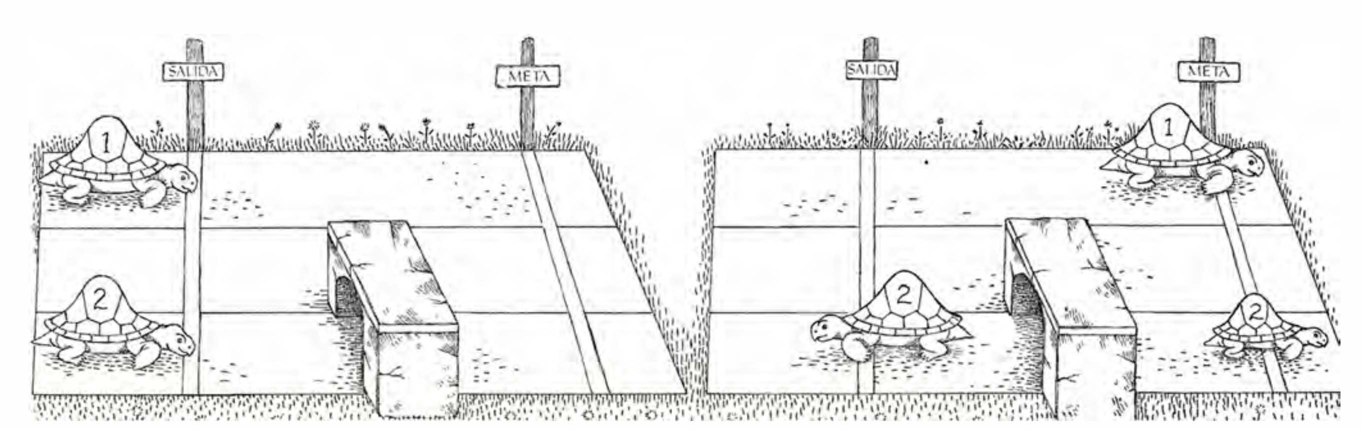
¿cuánto tarda en cruzar la pared? ¿Se viola con el tiempo de cruce el célebre límite de velocidad de Albert Einstein?

Observamos que la cima del caparazón de la tortuga 2, que representa la posición más probable del fotón que sufre efecto túnel, alcanza la línea de llegada antes que la cima del caparazón de la tortuga 1. Pero el morro de la tortuga 2 no llega antes de que lo haga el de la tortuga 1. Como los morros de las tortugas viajan a la velocidad de la luz, el fotón que señale que la bandera de salida ha sido bajada no podrá llegar en un tiempo menor que el impuesto por la causalidad.

Sin embargo, en un experimento típico, el morro representa una región de tan menguada probabilidad que raramente se observa un fotón en ella. Lo más probable es que el paradero del fotón, que se detecta sólo una vez, coincida con la cima. Así, aun cuando las tortugas lleguen morro con morro al final, la cima del caparazón de la tortuga 2 precede al de la tortuga 1 (recuérdese que la tortuga transmitida es más pequeña que la tortuga 1). Lo más probable es, por tanto, que el fotón que atraviesa la barrera por efecto túnel arribe antes que el que viaja sin estorbos a la velocidad de la luz. Nuestro experimento confirma esta predicción.

Pero no creemos que haya partes individuales del paquete de ondas que se muevan más deprisa que la luz; antes bien, el paquete de ondas se "reconfigura" a medida que viaja, hasta que la cima que emerge esté constituida principalmente por lo que forma al principio la parte delantera. En ningún punto el paquete de ondas del fotón que atraviesa el túnel viaja más deprisa que el fotón libre. En 1982, Steven Chu, de la Universidad de Stanford, y Stephen Wong, entonces en los Laboratorios AT&T Bell, observaron un efecto de reconfiguración similar. Mediante experimentos con pulsos láser formados por muchos fotones encontraron que los pocos que superaban cierto obstáculo llegaban antes que los que se movían libremente. Como cabe dentro de lo posible suponer que sólo los primeros fotones de cada pulso "pudieron" pasar, no hay por qué recurrir necesariamente al efecto de reconfiguración. Pero esta interpretación no era posible en nuestro caso porque estudiábamos sólo un fotón por vez. En el instante de la detección, todo el fotón "saltaba" instantáneamente a la parte transmitida del paquete de ondas y superaba a su gemelo en la meta más de la mitad de las veces.

Aunque la reconfiguración parece explicar nuestras observaciones, persiste el problema de por qué hay reconfiguración. Nadie conoce todavía una explicación física de la rapidez del efecto túnel. Se trata de una vieja cuestión, pues ya en los años treinta Eugene Wigner, de la Universidad de Princeton, y otros físicos cayeron en la cuenta de que la teoría cuántica parecía implicar que las velocidades de travesía por efecto túnel habían de ser elevadas. Algunos suponían que las aproximaciones utilizadas en esa predicción debían ser incorrectas, mientras que otros, defensores de su validez, abogaban por una interpretación restrictiva de la misma. Markus Büttiker y Rolf Landauer, del centro de investigación Thomas J. Watson de la IBM, sugieren que magnitudes distintas del tiempo de llegada de la cima del paquete de ondas (por ejemplo, el ángulo que gira una partícula con espín mientras sufre el efecto túnel) podrían ser más apropiadas para describir el tiempo "pasado" dentro de la barrera. Aunque la mecánica cuántica puede predecir el tiempo medio de llegada de una partícula, carece de la noción clásica de trayectoria,



3. CARRERA DE TORTUGAS, una metáfora idónea para caracterizar el tiempo de travesía por efecto túnel. Cada reptil representa la distribución de probabilidad de la posición de un fotón. La cima está donde más probable es que se detecte la posición de un fotón. Las tortugas salen juntas (*izquierda*). La tortuga 2 encuentra una barrera y se desdobla en dos (*derecha*). Como la posibilidad del efecto túnel es baja, la tortuga transmitida es pequeña, mientras que la reflejada es casi tan alta como la original. En los raros casos en que se da el efecto túnel, la cima del caparazón de la tortuga 2 cruza primero, en promedio, la línea de llegada, con una velocidad media de travesía por efecto túnel 1,7 veces la de la luz. Pero el morro de la tortuga que pasa por efecto túnel nunca viaja más deprisa que la luz: obsérvese que ambas tortugas permanecen "morro con morro" hasta el final. Por tanto, la ley de Einstein no se viola.

sin la cual no tiene mucho sentido hablar del tiempo pasado en una zona.

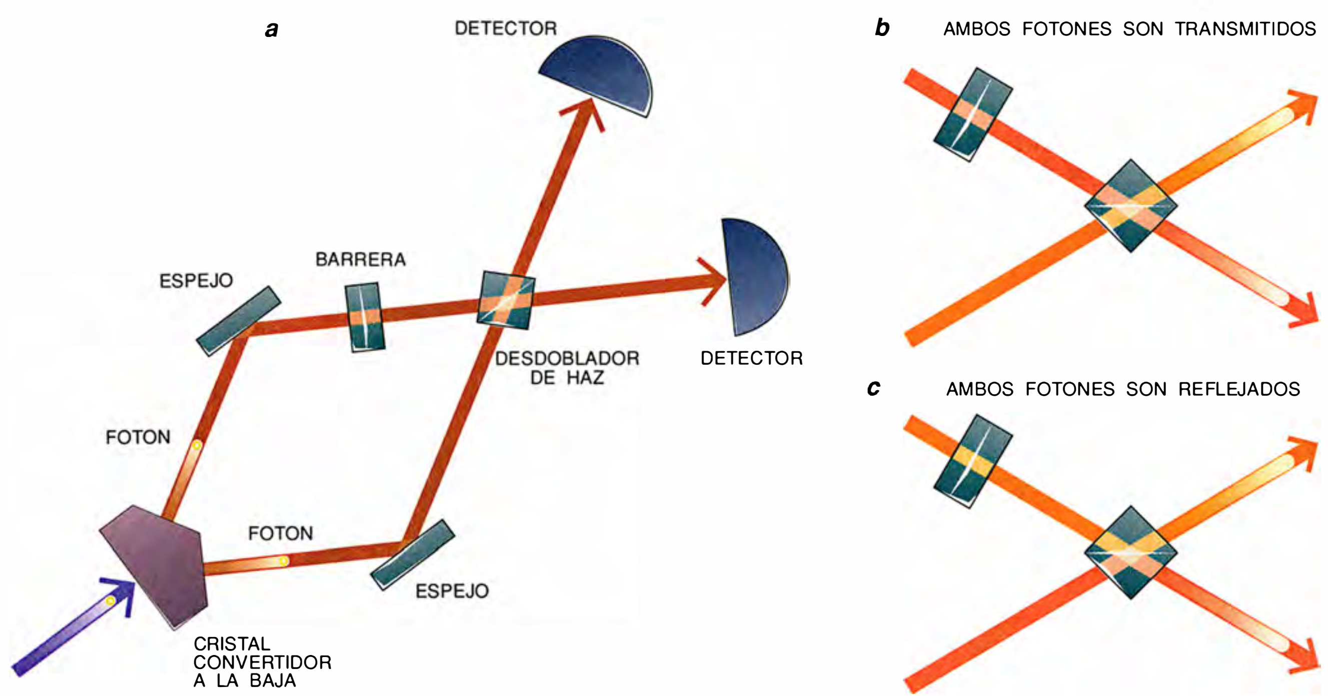
Una peculiar característica del fenómeno nos indica cómo podría explicarse la rapidez de la travesía por efecto túnel. Según la teoría, un aumento en la anchura de la barrera no alarga el tiempo necesario para que el paquete de ondas la atraviese. Para entenderlo, acudamos al principio de incertidumbre. Cuanto menos tiempo empleemos en el estudio de un fotón, menos seguros podremos estar de cuál es su energía. Existe un período inicial en el que la energía del fotón lanzado contra la barrera es incierta; durante ese tiempo es como si, en cierto sentido, el fotón, aunque no tenga suficiente energía para atravesar la barrera, pudiera tomar prestada temporalmente la suficiente que le permitiera superarla. La duración de este período de gracia depende sólo de la energía tomada, no de la anchura de la barrera. Con independencia de cuán ancha sea la barrera, el tiempo de paso por ella es el mismo. Cuando la barrera es lo bastante ancha, la velocidad de paso aparente excede a la de la luz.

Por supuesto, para que nuestras mediciones tuviesen sentido las tortugas tenían que recorrer exactamente la misma distancia. En esencia, teníamos que hacer tan recto el recorrido que ninguna de las tortugas contase con la ventaja de correr por la parte de dentro. De esa manera, cualquier retraso o adelanto que se produjese cuando colocáramos la barrera en una de las trayectorias se debería sólo al efecto túnel cuántico. Una manera de lograr que los dos recorridos sean iguales consiste en determinar cuánto tiempo tarda un fotón en ir de la fuente al detector en cada trayectoria: una vez los tiempos fueran iguales sabríamos que los recorridos también lo eran.

Mas, para realizar tal medida con un cronómetro convencional, las manecillas habrían de girar casi un millón de billones de veces por minuto. Para nuestra fortuna, el equipo de Leonard Mandel, de la Universidad de Rochester, había desarrollado una técnica de interferencia con la que pudimos dar tiempos a nuestros fotones.

El cronómetro cuántico de Mandel se basa en un "desdoblador de haz", elemento óptico que transmite una mitad de los fotones que le llegan y refleja la otra. Se establece la carrera de manera que los paquetes de ondas de los dos fotones se suelten al mismo tiempo desde la línea de salida y se acerquen al desdoblador de haz por lados opuestos. Para cada par de fotones hay cuatro posibilidades: que ambos atraviesen el desdoblador de haz; que ambos reboten en él; que los dos salgan juntos por un lado, o que lo hagan por el otro. Las dos primeras posibilidades, que se transmitan o reflejen ambos fotones, causan las "detecciones en coincidencia", en virtud de las cuales cada fotón alcanza un detector distinto (situado a cada lado del desdoblador de haz), y los dos detectores se disparan en un margen de una milmillonésima de segundo. Desgraciadamente, este tiempo de resolución es aproximadamente el mismo que los fotones tardan en recorrer todo el camino; es tan poco fino, que carece de utilidad.

Así pues, ¿para qué servían el desdoblador de haz y los detectores en la disposición de la carrera? Jugábamos, simplemente, con la longitud de una de las trayectorias hasta que todas las detecciones en coincidencia desaparecían. De esa manera lográbamos que los fotones alcanzasen el desdoblador de haz al mismo tiempo, lo que quería decir que las dos pistas eran iguales. Hay que admitir que este planteamiento es chocante: al fin y al cabo, de recorridos iguales cabría esperar llegadas en coincidencia en los dos de-



4. EL INTERFEROMETRO DE FOTONES GEMELOS (*a*) cronometra con precisión las carreras de fotones. Originados en un cristal de conversión a la baja, los fotones son encauzados, mediante espejos, hacia un desdoblador de haz. Si un fotón supera al otro en la llegada al desdoblador (a causa de la barrera), se dispararán los dos detectores en la mitad de las carreras, más o menos. Dos posibilidades conducen a esas detecciones en coincidencia: el desdoblador de haz transmite ambos fotones (*b*) o refleja uno y otro (*c*). Aparte de por sus tiempos de llegada, no hay manera de saber qué fotón siguió qué camino; cualquiera podría haber atravesado la barrera. (Esta no localidad es en realidad la base del funcionamiento del interferómetro.) Si ambos fotones alcanzan el desdoblador de haz simultáneamente, por razones cuánticas saldrán en la misma dirección; ninguno de los dos detectores apuntará un registro. Se dice entonces que las dos posibilidades indicadas se interfieren destructivamente.

Paquetes de ondas

Para entender en qué consiste un paquete de ondas, construyamos uno sumando ondas de distintas frecuencias. Empecemos con una frecuencia central (*señalada por la curva verde*), una onda sin inicio ni final. Si añadimos dos ondas más de frecuencias ligeramente menor y mayor (*curvas naranja y azul, respectivamente*), obtendremos un objeto pulsante (*curva blanca*). Cuando se añaden suficientes frecuencias, se forma un verdadero pulso, o paquete de ondas, que está confinado en una pequeña región del espacio. Si el intervalo de frecuencias utilizado para formar el pulso disminuyera (por ejemplo, usando colores que vayan sólo del amarillo al verde, en vez del naranja al azul), crearíamos un pulso más largo. Inversamente, si hubiéramos incluido todos los colores, del rojo al violeta, el paquete podría haber sido incluso más corto.

En términos matemáticos, si designamos por $\Delta\nu$ la anchura del intervalo de colores y por Δt la duración del pulso, podemos escribir

$$\Delta\nu\ \Delta t \geq 1/4\pi,$$

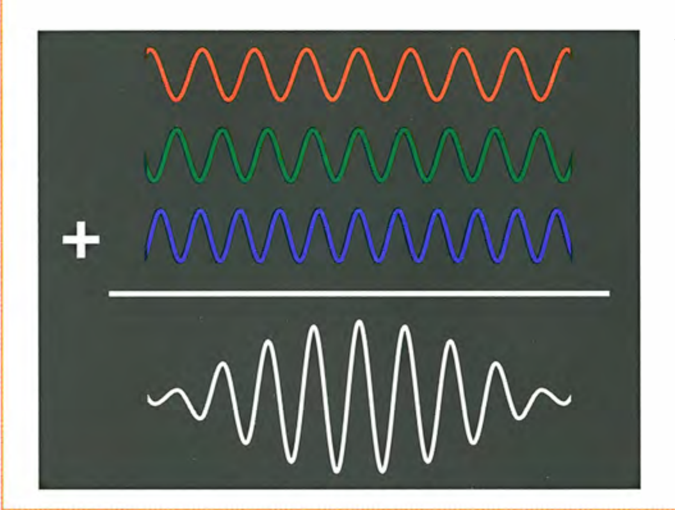
que simplemente expresa que se necesita un intervalo de color más ancho para formar un paquete de ondas más corto. Esto es cierto para cualquier clase de ondas: de luz, sonido, agua, etc.

El fenómeno adquiere un significado físico nuevo cuando se identifica la frecuencia electromagnética, ν, con la energía del fotón, E, mediante la relación de Planck-Einstein $E = h\nu$, donde h es la constante de Planck. El aspecto corpuscular de la mecánica cuántica aparece en este punto. O lo que es lo mismo, la energía de un fotón depende de su color. Los fotones rojos tienen unas tres quintas partes de la energía de los fotones azules. La expresión matemática anterior puede reescribirse entonces así:

$$\Delta E\ \Delta t \geq h/4\pi.$$

Los físicos están muy familiarizados con esta fórmula y la denominan principio de incertidumbre de Heisenberg (existe una versión análoga, quizá más conocida, para la posición y el momento). En virtud de este principio, para los experimentos descritos en el artículo resulta estrictamente imposible, incluso con un aparato perfecto, saber con precisión a la vez el tiempo de emisión de un fotón y su energía.

Aunque hemos llegado al principio de incertidumbre a partir de la construcción de paquetes de ondas, su aplicación tiene mucho mayor alcance y sus connotaciones son más generales. Nunca será excesiva la insistencia en que la incertidumbre es inherente a las leyes de la naturaleza. No es una mera consecuencia de la poca precisión de los instrumentos de nuestros laboratorios. El principio de incertidumbre impide que los electrones caigan en el núcleo atómico, limita finalmente la resolución de los microscopios y, según algunas teorías astrofísicas, se le debe la distribución no uniforme de la materia en el universo en sus comienzos.



tectores. ¿Por qué la ausencia de éstas es, en cambio, la señal deseada?

La razón estriba en la interacción mutua entre partículas de la mecánica cuántica. Todas las partículas de la naturaleza son o bosones o fermiones. Los fermiones idénticos (los electrones, por ejemplo) obedecen el principio de exclusión de Pauli, que evita que cualquier par de ellos estén en el mismo lugar al mismo tiempo. Por el contrario, a los bosones (entre los que se cuentan los fotones) les gusta estar juntos. Así, una vez alcanzado el desdoblador de haz en el mismo instante, los dos fotones prefieren salir por la misma dirección. Esta preferencia conduce a que se detecten menos coincidencias (ninguna, de hecho, en un experimento ideal) que las que tendrían lugar si los fotones actuaran independientemente o llegaran al desdoblador de haz en momentos distintos.

Por tanto, para garantizar que la carrera de los fotones no escondiera ningún truco, ajustamos uno de los recorridos. El ajuste concluye cuando el número de las detecciones en coincidencia desciende hasta un mínimo, el que se alcanza cuando los fotones tardan exactamente el mismo tiempo en llegar al desdoblador de haz. La anchura de este vientre en el número de detecciones en coincidencia (que es el factor limitante de la resolución de nuestros experimentos) concuerda con el tamaño de los paquetes de onda de los fotones, y suele ser, aproximadamente, igual a la distancia que la luz recorre en centésimas de billonésimas de segundo.

Sólo cuando estuvimos seguros de que los dos recorridos eran iguales instalamos la barrera y dimos comienzo a la competición. Descubrimos entonces que el número de coincidencias había dejado de ser mínimo, de donde se deducía que uno de los fotones estaba llegando antes al desdoblador de haz. A fin de restablecer el mínimo, tuvimos que alargar la trayectoria seguida por el fotón que experimentaba el efecto túnel. Esta corrección señalaba que los fotones tardan menos tiempo en cruzar una barrera que en viajar por el aire.

No por ducho que se sea en diseñar pistas de carreras para fotones y en crear ingeniosos dispositivos de control temporal debería dejar de ser difícil el llevar adelante la competición. El hecho mismo de que la prueba haya podido llevarse a cabo constituye una segunda validación del principio de no localidad, ya que, si no hubiera sido por él, habría resultado imposible controlar de manera precisa el tiempo de carrera. Para determinar el instante de emisión de un fotón con la máxima exactitud, está claro que lo ideal sería que el paquete de ondas del fotón fuera lo más corto posible. Sin embargo, el principio de incertidumbre establece que, cuanto mayor sea la precisión con que se determina el tiempo de emisión de un fotón, tanta mayor incertidumbre habrá en el conocimiento de su energía, es decir, de su color.

A causa del principio de incertidumbre había en nuestros experimen-

tos un toma y daca fundamental. Los colores que forman un fotón se dispersan en cualquier clase de cristal, lo que ensancha el paquete de ondas y reduce la precisión de la medida del tiempo. La dispersión se debe a que distintos colores viajan por el cristal a velocidades diferentes: en general, la luz azul avanza más despacio que la roja. Un ejemplo corriente de dispersión es el desdoblamiento de la luz blanca en sus colores constituyentes cuando atraviesa un prisma.

Cuando un pulso de luz corto pasa por un medio dispersivo (la propia barrera o uno de los elementos de cristal utilizados para dirigir la luz), se dispersa y forma un pulso "alargado": la parte más roja se alarga por delante y los azules se quedan detrás. Un simple cálculo muestra que la anchura de los pulsos de nuestro fotón se cuadriplicaría si atravesara unos dos centímetros y medio de cristal. La presencia de un tal ensanchamiento habría hecho que fuese del todo imposible el saber qué tortuga había cruzado primero la línea de llegada. El ensanchamiento del pulso del fotón no degradó la precisión de nuestra medida.

Aquí reside nuestro segundo ejemplo de no localidad cuántica. En esencia, cada uno de los fotones gemelos tiene que recorrer las dos trayectorias a la vez. Por ello, y cual si se tratara de un acto de prestidigitación, se cancelan los potenciales errores en la determinación del tiempo.

Para entender este efecto de cancelación, hemos de examinar una propiedad especial de nuestros pares de fotones. Los pares surgen de "una conversión paramétrica espontánea a la baja", proceso que acontece cuando un fotón atraviesa un cristal cuyas propiedades ópticas no son lineales. Un cristal así puede absorber un determinado fotón y emitir en su lugar dos, dotado cada uno de los cuales con una energía que será más o menos la mitad de la de su progenitor (éste es el sentido de la frase "conversión a la baja"). Un fotón ultravioleta, por ejemplo, producirá dos infrarrojos. Los dos fotones se emiten simultáneamente, y la suma de sus energías iguala exactamente la energía del fotón padre. En otras palabras, los colores de los pares de fotones están correlacionados: si uno es ligeramente más azul (y por tanto viaja más lento por el cristal), entonces el otro deberá ser ligeramente más rojizo (y moverse más deprisa).

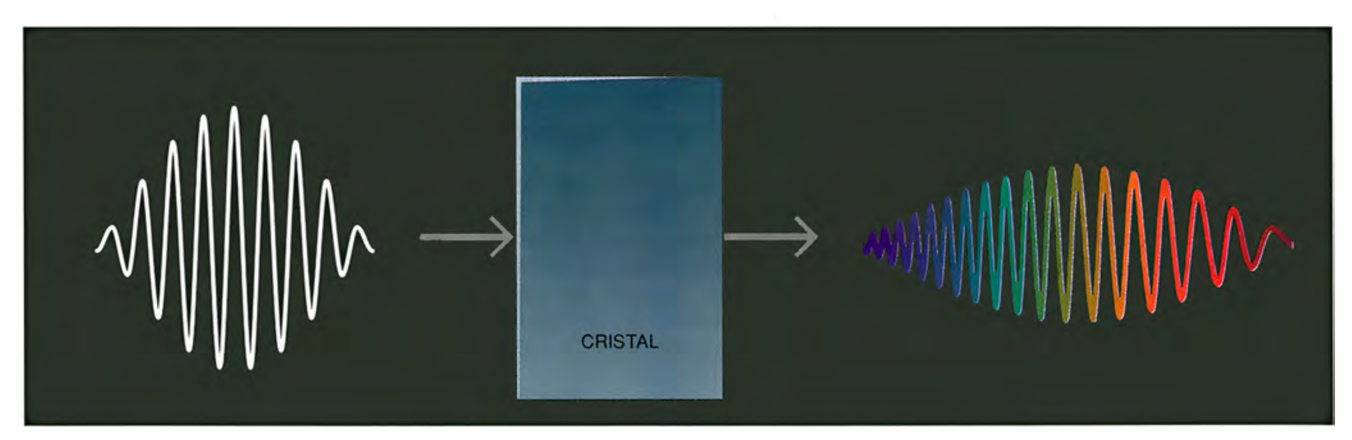
Se nos podría ocurrir que las diferencias entre hermanos afectaran al resultado de la carrera, que una tortuga fuera más atlética que la otra. Pero, gracias a la no localidad, cualquier diferencia que haya entre los gemelos resultará irrelevante. El punto clave es que ninguno de los detectores tiene manera alguna de identificar qué fotón tomó cada camino. Cualquiera de los fotones podría haber ido por la barrera.

El tener dos o más posibilidades coexistentes que llevan al mismo resultado final produce un "efecto de interferencia". Cada fotón sigue las dos trayectorias simultáneamente, y esas dos posibilidades son antagónicas entre sí. Es decir, la posibilidad de que el fotón que atraviesa el cristal sea el rojizo (el más rápido) va en contra de la posibilidad de que sea el azulado (el más lento) el que lo haga. En consecuencia, las diferencias de velocidad se compensan y los efectos de la dispersión se cancelan. Ahora no importa el ensanchamiento dispersivo de los pulsos de los fotones individuales. Si la naturaleza actuase localmente, no hubiéramos podido realizar ninguna medición. La única manera de describir lo que sucede es decir que cada gemelo viaja a lo largo de ambas trayectorias, la de la barrera y la libre, situación que es ejemplo de no localidad.

Hemos pasado revista a dos resultados no locales obtenidos de nuestros experimentos cuánticos: la medición del tiempo de paso por efecto túnel, para la que se requiere que dos fotones empiecen una carrera exactamente al mismo tiempo, y el efecto de cancelación de la dispersión, que se basa en una precisa correlación entre las energías de los fotones comprometidos en la carrera. En otras palabras, se dice que los fotones están correlacionados en energía (en lo que hacen) y en tiempo (en cuándo lo hacen). Nuestro último ejemplo de no localidad viene a ser combinación de los dos primeros: un fotón "reacciona" a lo que hace su gemelo instantáneamente con independencia de lo alejados que estén.

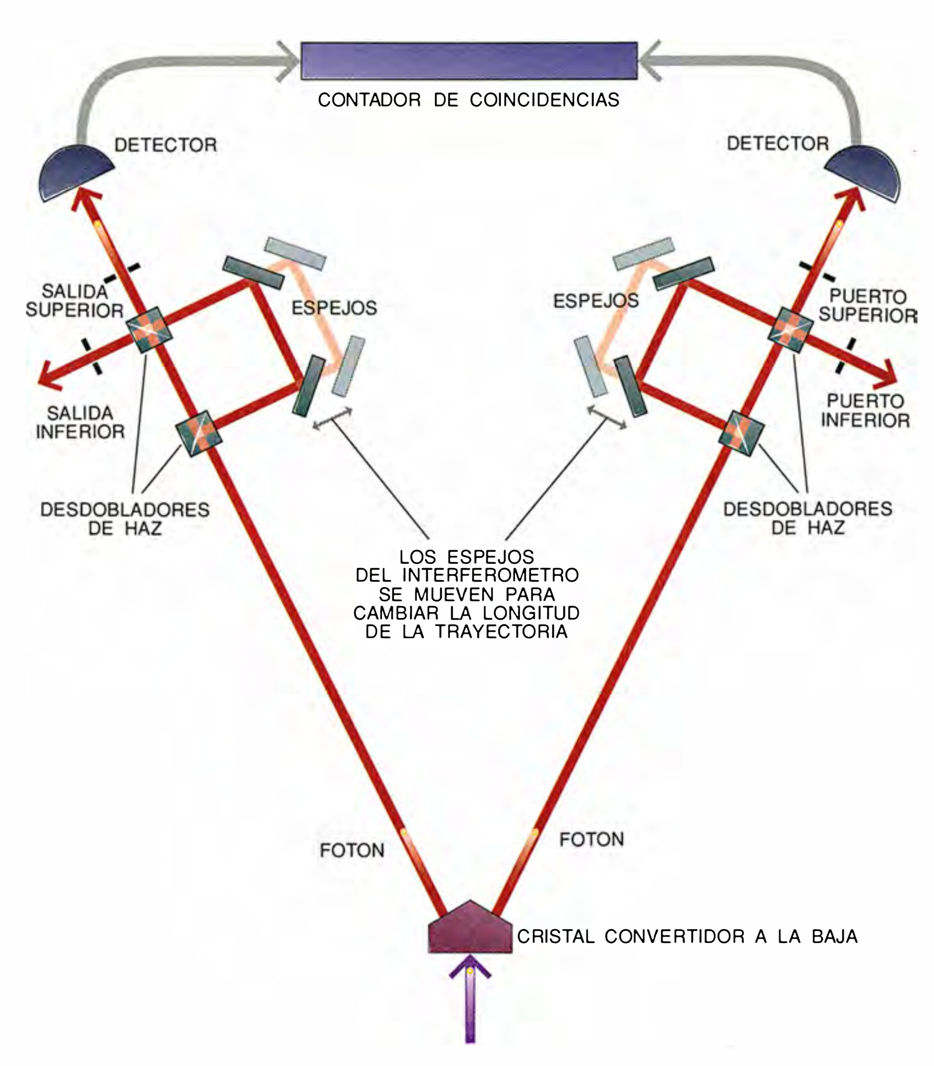
Los lectores entendidos quizá protesten; el principio de incertidumbre de Heisenberg, dirán, prohíbe la determinación precisa del tiempo y la energía a la vez. Y tendrían razón para una partícula. Para dos, sin embargo, la mecánica cuántica nos permite definir a la vez la diferencia entre sus tiempos de emisión y la suma de sus energías, aun cuando no se especifiquen los tiempos y las energías de ninguna de las partículas sueltas. Este hecho condujo a Einstein, Boris Podolsky y Nathan Rosen a concluir que la mecánica cuántica es una teoría incompleta. En 1935 formularon un experimento imaginario que mostraba las insuficiencias de que, según ellos, adolece la mecánica cuántica.

Si uno se cree la mecánica cuán-



5. LA DISPERSION de un pulso de luz tiene lugar debido a que cada color viaja a una velocidad diferente. Un pulso de luz corto que atraviesa un trozo de cristal se ensanchará y se formará un paquete de ondas "alargado": los colores rojizos se estirarán por delante mientras que los azulados se retrasarán.

tica, apuntaban estos discrepantes, entonces tendrá que aceptar que cualquier par de partículas producidas en un proceso tal como la conversión a la baja habrán de estar acopladas. Por ejemplo, supongamos que medimos el instante de emisión de una de las partículas. Debido a la estrecha correlación temporal entre ellas, podríamos predecir con certeza el instante de emisión de la otra partícula, sin perturbarla en ningún momento. Podríamos también medir directamente la energía de la segunda partícula e inferir entonces la de la primera. De alguna manera, habríamos logrado determinar con precisión la energía y el tiempo de cada partícula, saltándonos realmente el principio de incertidumbre. ¿Cómo entender las correlaciones y resolver esta paradoja?



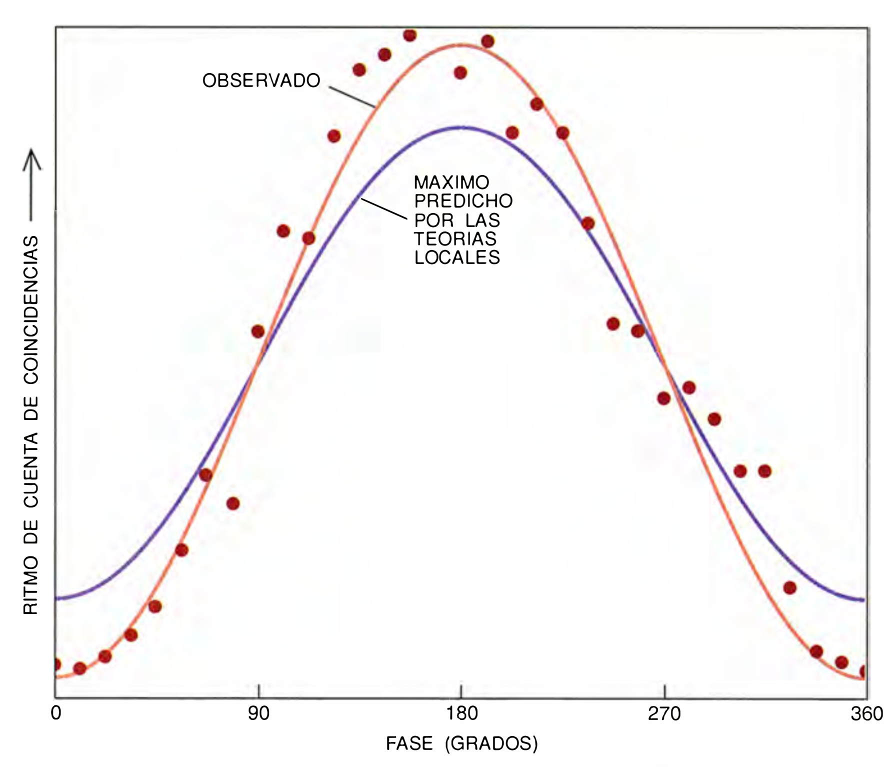
6. LA CORRELACION NO LOCAL entre dos partículas se manifiesta en el experimento de Franson. Se envían dos fotones hacia dos interferómetros separados, aunque idénticos. Cada fotón puede seguir un camino corto o tomar un "desvío" más largo en el primer desdoblador de haz. Pueden salir por la salida superior o la inferior. Un detector cuenta los fotones que pasan por la salida superior. Antes de entrar en su interferómetro ninguno de los fotones sabe por qué camino va a ir. Al dejarlo, cada uno sabe instantánea y no localmente lo que ha hecho su gemelo, y actúa en correspondencia.

Básicamente, hay dos opciones. La primera es que exista lo que Einstein llamaba "fantasmales acciones a distancia" (*spukhafte Fernwirkungen*). En ese marco, la descripción mecanocuántica de las partículas es todo lo que hay. No se asocia tiempo ni energía algunos a ningún fotón hasta que no se haga, por ejemplo, una medida de la energía. En ese momento sólo se observará una energía. Como la suma de las energías de los dos fotones es la energía del fotón padre definida, la previamente indeterminada energía del fotón gemelo, que no medimos, debe saltar instantáneamente al valor exigido por la conservación de la energía. Este "colapso" no local ocurriría con independencia de cuánto se hubiera alejado el segundo fotón. El principio de incertidumbre no se viola, pues sólo podemos determinar una variable o la otra: la medida de la energía perturba el sistema al introducir instantáneamente una nueva incertidumbre tocante al tiempo.

No debe aceptarse un modelo no local tan "disparatado" si existe forma más sencilla de entender las correlaciones. A tenor de cierta explicación intuitiva: los fotones gemelos abandonan la fuente en instantes definidos y correlacionados con energías definidas y correlacionadas. El hecho de que la mecánica cuántica no pueda especificar estas propiedades a la vez indica que la teoría es incompleta, nada más.

Einstein, Podolsky y Rosen apoyaban esta última explicación. Para ellos no había nada que fuese no local en las correlaciones observadas en los pares de partículas, pues las propiedades de cada partícula estaban determinadas en el instante de la emisión. La mecánica cuántica sólo era correcta en cuanto teoría probabilística, una especie de sociología fotónica, y no podía describir completamente todas las partículas individuales. Entraba en lo razonable que hubiera una teoría subyacente que predijese los resultados específicos de toda medida posible y demostrase que las partículas actúan localmente. Tal teoría habría de basarse en variables ocultas aún no descubiertas. En 1964, John S. Bell, del Laboratorio Europeo de Física de Partículas (CERN), estableció un teorema del que se seguía que no había manera de introducir variables ocultas locales que no produjese predicciones distintas de las ofrecidas por la mecánica cuántica.

Desde entonces, los resultados experimentales han apoyado la imagen no local (mecanocuántica) y han contradicho la intuitiva de Einstein, Podolsky y Rosen. Buena parte del mérito de haber emprendido la investigación experimental corresponde a los grupos dirigidos por John Clauser, de la Universidad de California en Berkeley, y por Alain Aspect, actualmente en el Instituto de Optica de Orsay, que en los años setenta y a comienzos de los ochenta examinaron las correlaciones entre polarizaciones de fotones. Más recientemente, John G. Rarity y Paul R. Tapster, del Centro Real de Señales y Radar de Inglaterra, han estudiado las correlaciones entre los momentos de fotones gemelos. Nuestro grupo ha llevado las pruebas un paso más lejos. Siguiendo una idea propuesta por James D. Franson, de la Universidad Johns Hopkins, realiza-



7. RITMO DE COINCIDENCIAS entre los detectores de la izquierda y la derecha en el experimento de Franson (*puntos rojos, con la línea del mejor ajuste*); este fenómeno abona la existencia de la no localidad. El eje horizontal representa la suma de las longitudes de las dos trayectorias largas en unidades angulares llamadas fases. El "contraste", o grado de variación en estos ritmos, supera el máximo permitido por las teorías locales y realistas (*línea azul*), de donde se sigue, tal y como indicó John Bell, del CERN, que las correlaciones han de ser no locales.

mos en 1989 un experimento para determinar si era algún modelo de variables ocultas locales, y no la mecánica cuántica, lo que explicaba las correlaciones de energía y tiempo.

En nuestro experimento, fotones gemelos provenientes de un cristal convertidor a la baja se enviaban por separado a interferómetros idénticos. Cada interferómetro estaba diseñado de manera muy parecida a una carretera que tiene un desvío auxiliar. Un fotón podía bien tomar el raíl directo de la fuente a su destino, bien seguir una trayectoria más larga (cuya longitud podíamos variar) recorriendo la vía auxiliar que llevaba al área de descanso y volvía a la carretera.

¿Qué sucede cuando enviamos los componentes de un par de fotones por tales interferómetros? Cada fotón elegirá al azar el camino largo (a través de la zona de descanso) o el camino corto y directo. Después de seguir una de las dos trayectorias, un fotón puede dejar su interferómetro por cualquiera de las dos salidas que tiene, la "superior" y la "inferior". Vimos que cada partícula tenía la misma probabilidad de abandonar el aparato por una u otra salida. La intuición sugería que la elección de una salida por uno de los fotones no estaba relacionada con la elección hecha en el otro interferómetro por su gemelo. Pero no era así: observamos fuertes correlaciones entre los caminos que tomaban los fotones al abandonar sus interferómetros. Por ejemplo, para determinadas longitudes de desvío, siempre que el fotón de la izquierda se iba por la salida superior, el gemelo de la derecha lo hacía por la inferior.

Se podría suponer que esta correlación existía desde el inicio, como cuando se esconde un peón blanco en una mano y uno negro en la otra. Dada la definición de partida, en cuanto una mano nos enseña el peón blanco sabemos que el otro tiene que ser negro.

Pero una correlación implantada desde el inicio no puede explicar lo que sucedía en nuestro experimento, bastante más extraño: cambiando la longitud de la trayectoria en cualquiera de los interferómetros, podíamos controlar la naturaleza de las correlaciones. Podíamos pasar gradualmente de una situación en la que los fotones siempre se iban por las mismas salidas (ambos por la superior o ambos por la inferior) de sus respectivos interferómetros a otra situación en la que siempre lo hacían por salidas opuestas. En principio, habría tal correlación aun cuando se produjera el ajuste de las longitudes de las trayectorias después de que los fotones hubiesen abandonado la fuente. En otras palabras, antes de entrar en el interferómetro ningún fotón sabe por qué camino va a ir, pero al dejarlo, cada uno sabe instantáneamente (no localmente) lo que ha hecho su gemelo y actúa en correspondencia.

A fin de analizar estas correlaciones observamos con qué frecuencia los fotones emergían a la vez de los interferómetros; contamos las coincidencias entre los detectores colocados en la salida "superior" de los dos dispositivos. Variando la longitud de cualquiera de las trayectorias largas no cambiaba el ritmo de detección de cada detector por separado. Pero sí se alteraba el ritmo de la cuenta de coincidencias, lo que indicaba que había una correlación para cada par de fotones. Esa alteración producía "franjas" que recordaban a las rayas luminosas y oscuras del tradicional interferómetro de dos rendijas que muestra la naturaleza ondulatoria de las partículas.

En nuestro experimento, las franjas señalan la existencia de un efecto de interferencia peculiar. De acuerdo con lo dicho antes, la interferencia puede interpretarse como la consecuencia de la presencia de dos o más posibilidades indistinguibles y coexistentes que llevan a un mismo resultado final (recuérdese nuestro segundo ejemplo de no localidad, en el que cada fotón viajaba a lo largo de dos trayectorias distintas simultáneamente, por lo que se producía una interferencia). En el caso que nos ocupa hay dos posibilidades de producirse un suceso que se añada a la cuenta de coincidencias: o bien ambos fotones van por las trayectorias cortas, o bien ambos lo hacen por las trayectorias largas. (Cuando un fotón va por una trayectoria corta y el otro por una larga, llegan en momentos distintos y no se interfieren entre sí; estos sucesos fueron descartados electrónicamente.)

La coexistencia de estas dos posibilidades, desde el punto de vista clásico, carece de sentido. Dado que los dos fotones llegan al detector en el mismo instante después de haber recorrido ambas trayectorias, la corta y la larga, es como si cada fotón hubiera sido emitido "dos veces", una para la trayectoria corta y otra para la larga.

Para entender esto mejor, imagínese el lector en el papel de detector. Usted recibe una carta de un amigo de otro continente. Sabe que la carta

le ha llegado por avión o por barco; fue echada, pues, hace una semana (avión) o hace un mes (barco). Para que se diera un efecto de interferencia, la carta debería haber sido echada en ambos momentos. En el marco de la física clásica lo que acabamos de decir es un absurdo. Pero en nuestro experimento la observación de las franjas de interferencia implica que cada uno de los fotones gemelos posee dos tiempos indistinguibles de emisión por el cristal. Cada fotón nace dos veces.

Lo que es más importante, la forma exacta de las franjas de interferencia sirve para diferenciar la mecánica cuántica de cualquier teoría concebible de variables ocultas locales (en la que, por ejemplo, cada fotón naciese ya con una energía definida o sabiendo qué salida va a tomar). De acuerdo con las condiciones limitantes ("constricciones") deducidas por Bell, ninguna teoría de variables ocultas local puede predecir franjas sinusoidales que presenten un "contraste" superior al 71 por ciento; es decir, la diferencia en intensidad entre las zonas luminosas y oscuras tiene una cota infranqueable determinada. Sin embargo, nuestros datos presentan franjas que tienen un contraste de aproximadamente el 90 por ciento. Si se hacen ciertas hipótesis suplementarias razonables se puede concluir de estos datos que la imagen intuitiva, local y realista, sugerida por Einstein y sus seguidores es equivocada: es imposible explicar los resultados observados sin reconocer que el resultado de una medida efectuada en un lado depende no localmente del resultado de otra medida realizada en el lado opuesto.

Así pues, ¿está en peligro la teoría de la relatividad de Einstein? No, por sorprendente que parezca. En efecto, no hay manera de utilizar las correlaciones entre partículas para enviar una señal más rápida que la luz. La razón estriba en que es aleatorio que un fotón llegue a su detector o que, por el contrario, utilice la salida de abajo. Sólo comparando los registros manifiestamente aleatorios de los contadores de los dos detectores, para lo que es necesario que se junten los datos, podremos observar las correlaciones no locales. El principio de causalidad permanece incólume.

Los aficionados a la fantasía científica lamentarán quizá que las comunicaciones más rápidas que la luz sigan pareciendo imposibles. Pero se ha intentado sacar el mayor provecho posible de la situación. Varios físicos han propuesto que se emplee la aleatoriedad de las correlaciones en varios esquemas codificadores. Las claves producidas por esos sistemas de criptografía cuántica serían absolutamente indescifrables (*véase* "Criptografía cuántica", por Charles H. Bennett, Gilles Brassard y Artur D. Ekert; INVESTIGACION Y CIENCIA, diciembre de 1992).

Hemos visto, pues, la no localidad en tres casos distintos. Primero, en el proceso del efecto túnel, un fotón es capaz de llegar al otro lado de una barrera y de cruzarla siempre en un mismo tiempo, con independencia de la anchura de la misma. Segundo, en los experimentos de alta resolución temporal la cancelación de la dispersión depende de que cada fotón haya recorrido en el interferómetro ambas trayectorias. Por último, en el postrer experimento revisado, se manifiesta una correlación no local de la energía y el tiempo entre dos fotones mediante el acoplamiento de éstos una vez abandonados los interferómetros. Aunque en nuestros experimentos los fotones estaban separados por sólo algunos centímetros, la mecánica cuántica predice que las correlaciones se hubieran observado por muy alejados que hubieran estado los dos interferómetros.

La naturaleza ha sabido evitar cualquier contradicción con la noción de causalidad, ya que de ninguna manera es posible utilizar cualquiera de los anteriores efectos para enviar señales más deprisa que la luz. La delicada coexistencia de la relatividad, que es teoría local, y la mecánica cuántica, teoría no local, ha capeado de nuevo la tormenta.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

QED: THE STRANGE THEORY OF LIGHT AND MATTER. Richard P. Feynman. Princeton University Press, 1985.

SPEAKABLE AND UNSPEAKABLE IN QUANTUM MECHANICS. J. S. Bell. Cambridge University Press, 1988.

HIGH-VISIBILITY INTERFERENCE IN A BELL-INEQUALITY EXPERIMENT FOR ENERGY AND TIME. P. G. Kwiat, A. M. Steinberg y R. Y. Chiao en *Physical Review A*, vol. 47, n.º 4, págs. R2472-R2475; 1 de abril, 1993.

THE SINGLE-PHOTON TUNNELING TIME. A. M. Steinberg, P.G. Kwiat y R. Y. Chiao en *Proceedings of the XXVIIIth Rencontre de Moriond*. Dirigido por Jean Trân Thanh Vân. Editions Frontières, Gif-sur-Yvette, Francia (en prensa).

SUPERLUMINAL (BUT CAUSAL) PROPAGATION OF WAVE PACKETS IN TRANSPARENT MEDIA WITH INVERTED ATOMIC POPULATIONS. Raymond Y. Chiao en *Physical Review A* (en prensa).

Anergia de las células *T*

Las células del sistema inmunitario descubren los antígenos, pero se mantienen quietas si no perciben ciertas señales complementarias. La terapia tiene en ese comportamiento un filón a explotar

Ronald H. Schwartz

El sistema inmunitario consta de miles de millones de linfocitos, un tipo de leucocitos que circulan por la sangre. Estas células están al acecho de cualquier materia foránea o nueva que pueda denunciar la infiltración, en los tejidos, de un virus, una bacteria o un tumor. Desenmascarado el intruso, los linfocitos organizan la defensa frente al mismo.

Al objeto de maximizar su capacidad detectiva, el sistema inmunitario ha desarrollado un mecanismo genético que sitúa un receptor molecular de características específicas sobre la superficie de cada linfocito. La diversidad de estos receptores le permite al sistema reconocer una serie ilimitada de moléculas extrañas. Mas, al propio tiempo, este mecanismo representa un problema para el sujeto: algunas de la moléculas ante las cuales el sistema inmunitario puede reaccionar son constituyentes de los tejidos normales del individuo. Puesto que tales respuestas podrían resultar lesivas, el sistema inmunitario debe realizar ajustes que eviten su propia autodestrucción. A ese proceso se le denomina inducción de tolerancia.

La inmunología reseña varios mecanismos inductores de tolerancia. El más conspicuo consiste en la eliminación física, durante su maduración, de los linfocitos que reconocen las moléculas del propio organismo. Se habla entonces de deleción clonal. Un segundo mecanismo, la inmunorregulación, demanda la generación de células reguladoras que debilitan las respuestas dañinas o incorrectas de los linfocitos. Desde hace poco se conoce un tercer mecanismo: la anergia, proceso por el que las células autorreactivas no intervienen, habida cuenta de la forma en que las moléculas se presentan ante ellas.

Aunque nos encontramos en los comienzos de esta línea de investigación, los biólogos han identificado ya algunas moléculas que parecen mediar en la anergia. Cierto es que ignoramos si ésta desempeña una función principal en la inducción de la tolerancia, o si su participación es sólo secundaria. Pero ello no obsta para confiar en las posibilidades terapéuticas que ofrece su capacidad de mantener bajo control la respuesta inmunitaria. Podría aprovecharse la inducción selectiva de la anergia en la evitación del rechazo de trasplantes. Y cabe mirar hacia ella en el tratamiento de pacientes con enfermedades autoinmunes, quienes portan linfocitos que atacan algunos de sus propios tejidos.

Para entender el fenómeno de la anergia conviene estar al corriente de la forma en que el sistema inmunitario identifica los agentes patógenos y responde a su presencia. Hay una primera fase de preparación de la molécula de proteína extraña, el "antígeno", que pueda, luego, ser objeto de identificación. Células dendríticas interdigitantes y otras células presentadoras de antígenos carroñean materiales procedentes del torrente sanguíneo y de los tejidos, y los digieren. En el interior celular, fragmentos de antígeno se unen a un tipo especial de proteínas, las del complejo principal de histocompatibilidad (MHC, del inglés *Major Histocompatibility Complex*).

Las moléculas del MHC transportan los fragmentos antigénicos hasta la superficie de la célula presentadora y los exponen ante un tipo de linfocitos, las células *T* auxiliares, o coadyuvantes, que coordinan y ejecutan muchas funciones de la lucha contra la enfermedad. Cada célula *T* está equipada con moléculas de receptor específico de antígenos que la capacita para el reconocimiento de un solo tipo de fragmento de antígeno unido a una molécula del complejo principal de histocompatibilidad.

Si una célula *T* encuentra el antígeno específico sobre una célula presentadora, y si esta última exhibe las señales apropiadas, el linfocito responderá entonces de dos maneras principales. Una de ellas consiste en su agrandamiento y división, incrementándose por tanto el número de células que reaccionarán frente a ese antígeno. La otra forma estriba en segregar linfocinas, proteínas que bloquean directamente el agente patógeno o reclutan otras células que participan en la respuesta inmunitaria.

Las células *T* coadyuvantes producen interleucinas, linfocinas que estimulan otra de las poblaciones fundamentales de los linfocitos, las células *B*, instándolas a fabricar anticuerpos. Los anticuerpos se unen selectivamente con los antígenos; aquéllos son formas solubles de las moléculas receptoras de antígenos de la superficie de las células *B*. Pero no basta la unión de un antígeno al receptor

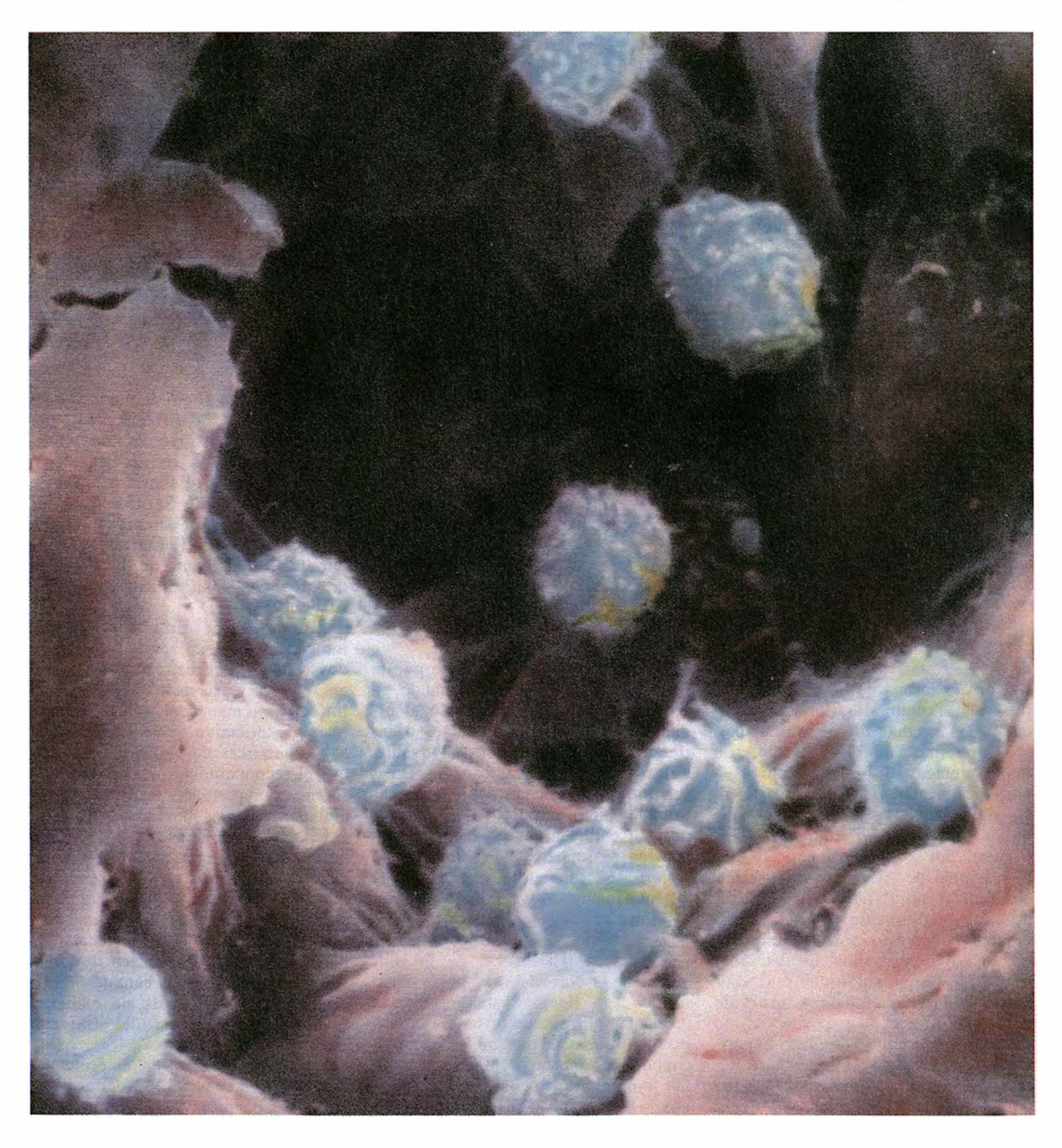
1. LOS LINFOCITOS *T* pertenecen a un tipo especial de leucocitos que regulan, en buena parte, la respuesta del sistema inmunitario ante la invasión del organismo por sustancias extrañas y microorganismos. Se ha descubierto que el proceso de anergia "desconecta" grupos específicos de células *T*. La anergia podría explicar, hasta cierto punto, por qué el sistema inmunitario no ataca los tejidos sanos propios. (Microfotografía cedida por Robert Becker/Custom Medical Stock.)

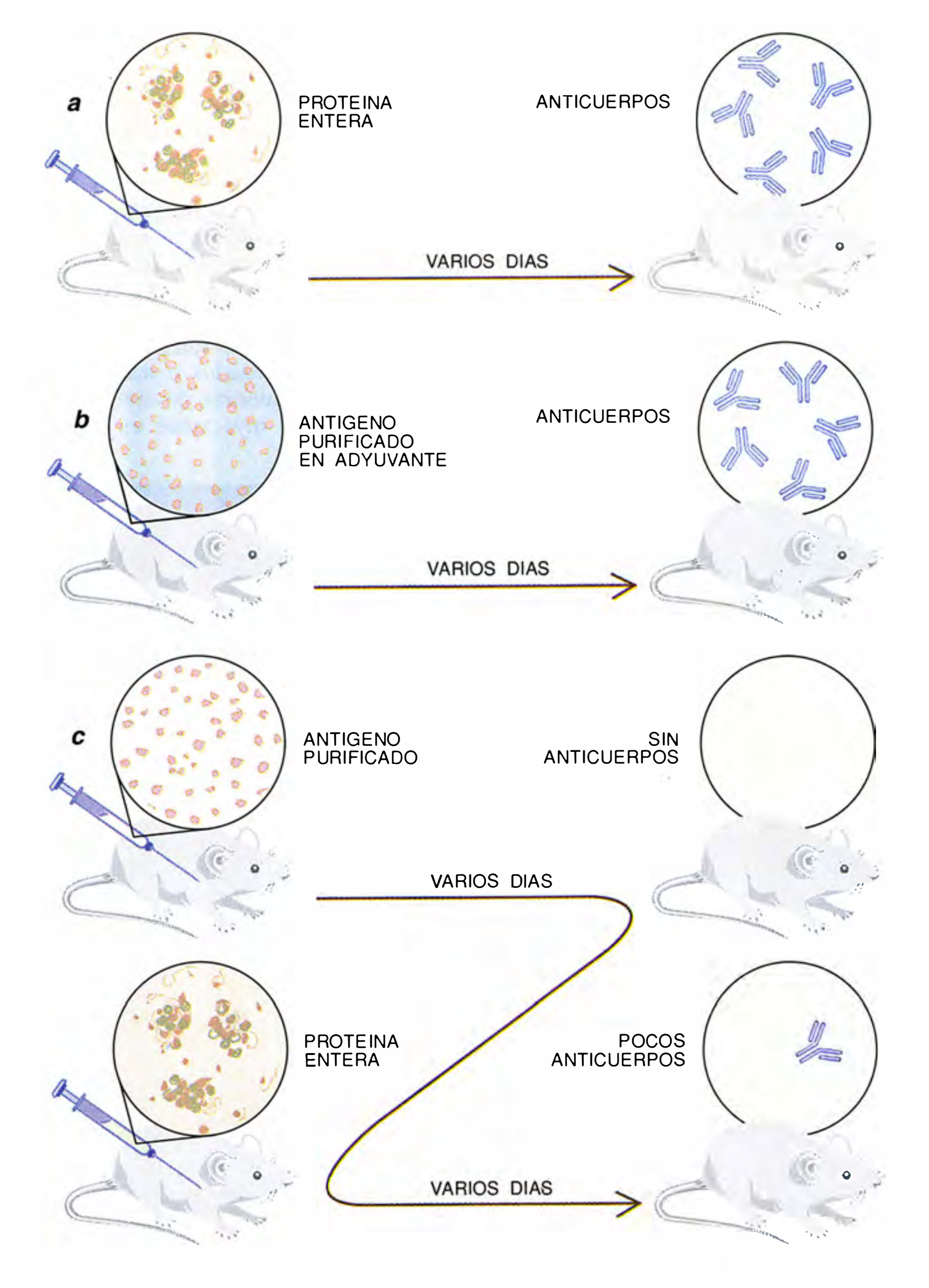
RONALD H. SCHWARTZ, uno de los descubridores de la anergia de las células *T*, dirige el laboratorio de inmunología del Instituto Nacional de Alergia y Enfermedades Infecciosas, de Estados Unidos. Acabada la carrera de química en la Universidad de Cornell, inició la de medicina, que concluyó con el doctorado en Harvard en 1970. Tres años después, la Universidad de Rutgers le concedía el mismo grado académico en la especialidad de microbiología. Comparte su labor investigadora con la asesoría empresarial.

de una célula para su activación: la célula *B* necesita de la ayuda de una célula *T*. Con ese fin, la célula *B* internaliza el antígeno, lo digiere como una célula presentadora lo haría y expone los fragmentos sobre su superficie unidos a moléculas del MHC. Si una célula *T* reconoce el antígeno ahora presente en la superficie, se activa y produce linfocinas y otras moléculas. Estas sustancias, a su vez, completan la estimulación de la célula *B*. Como resultado de ello, los anticuerpos se vierten a la circulación para descubrir y neutralizar los agentes infecciosos que hallen en el organismo.

Las linfocinas de las células *T* coadyuvantes activan también otra subpoblación de linfocitos, las células *T* citotóxicas, que matan células en los tejidos infectados por virus y bacterias. Estas respuestas de anticuerpos y de células *T* vienen a ser algo así como dos brazos armados de la defensa inmunitaria frente a los agentes patógenos.

Al igual que las células *B* y las células *T* citotóxicas, las células *T* coadyuvantes necesitan, para activarse, algo más que la señal que proviene del reconocimiento de un antígeno. Como demuestran datos muy diversos, se requiere la presencia de una segunda señal molecular en la célula presentadora del antígeno. Los primeros experimentos que sugerían la necesidad de dos señales los realizó en 1962 David W. Dresser cuando se encontraba en el Instituto de Tecnología de California. Vio que, si eliminaba todos los agregados o acúmulos de proteínas de muestras de antígenos foráneos antes de inyectarlos en rato-





2. ALGO MAS QUE EL ANTIGENO se necesita para que se desencadene una respuesta inmunitaria eficaz. Si se inyecta en los ratones una preparación de proteínas íntegra, se desarrollan anticuerpos contra el antígeno (*a*). Igualmente, los ratones producen anticuerpos si reciben por inyección proteínas purificadas suspendidas en adyuvante (*b*). Pero si los roedores reciben exclusivamente el antígeno purificado, entonces no se produce la respuesta (*c*). Además, esos mismos ratones responderán sólo muy débilmente tras recibir incluso inyecciones de la proteína completa. La exposición al antígeno purificado determina que los ratones se tornen tolerantes.

nes, las restantes proteínas solubles se volvían incapaces de provocar una respuesta inmunitaria normal, medida por la producción de anticuerpos. Las proteínas solubles se hicieron inmunogénicas de nuevo sólo después de que Dresser las emulsificara en un adyuvante, una mezcla que había sido desarrollada por Jules Freund, del norteamericano Instituto Nacional de Alergia y Enfermedades Infecciosas (NIAID), hoy fallecido. Este adyuvante era el típico brebaje compuesto por aceite mineral, una solución salina, un detergente y una forma del organismo causante de la tuberculosis y destruido por el calor.

Dresser descubrió en su experimento que los ratones inyectados solamente con los antígenos disgregados se hacían tolerantes, es decir, eran incapaces de dar una respuesta inmunitaria normal, aun cuando, a renglón seguido, se provocase al organismo con antígenos intactos o antígenos suspendidos en el adyuvante. Tales resultados le indicaban a Dresser que todo antígeno debía, para ser inmunogénico, reunir dos propiedades: su carácter de extraño y la capacidad de ser adyuvante. Por sí sola, supuso, la foraneidad paralizaba el sistema inmunitario e inhibía respuestas futuras.

P. C. Frei, Baruj Benacerraf y G. Jeannette Thorbecke, de la Universidad de Nueva York, profundizaron en esa línea. Sostenían que la propiedad de ser adyuvante era imprescindible para que un antígeno se captara por ciertas células del sistema inmunitario, como los macrófagos, y se desencadenara la respuesta. (Suponíase que el adyuvante de Freund y los agregados resaltaban la presencia del antígeno o lo hacían más atractivo para esas células.) Se sabía ya por entonces que los extractos químicos de los macrófagos que habían captado antígenos eran más inmunogénicos que los propios antígenos. En el experimento de Dresser, veían los inmunólogos, los antígenos purificados habrían orillado a los macrófagos para encaminarse directamente hacia los linfocitos; carecían, pues, de un componente del macrófago que era crucial para una respuesta positiva.

Transcurrido cierto tiempo, y para dar razón de lo observado por Dresser, se construyeron dos modelos interpretativos en el laboratorio de Peter A. Bretscher y Melvin Cohn, del Instituto Salk de Estudios Biológicos en San Diego, en 1969, y en el de Kevin J. Lafferty y Alistair J. Cunningham, de la Facultad de Medicina John Curtin en Canberra, en 1974.

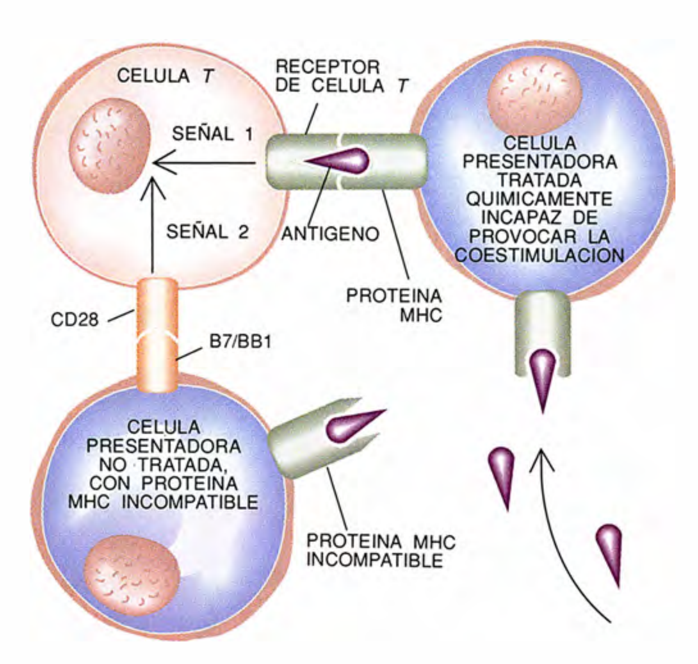
El modelo de Bretscher y Cohn indica, en esencia, que se requieren dos señales para activar un linfocito en reposo; y, si recibe sólo una, el linfocito permanecerá quieto. En ese marco explicativo, una y otra señal son específicas de antígeno; vale decir: el reconocimiento de la sustancia foránea por parte del linfocito genera ambas sustancias por separado.

El modelo de Lafferty y Cunningham se apoya también en la necesidad de dos señales, pero propone que la segunda no depende del reconocimiento del antígeno, una idea que encaja mejor con los resultados del adyuvante no específico de Dresser. La segunda señal, carente de eficacia por sí sola, unida sin embargo a la señal específica del antígeno estimulará al linfocito.

No se trabajó más en el problema de la activación del linfocito hasta los años ochenta. Para entonces, la

inmunología experimental había avanzado, en sus técnicas al menos, lo suficiente para poner a prueba dichos modelos. De gran importancia fue el desarrollo de la clonación de linfocitos *T*, protocolo que permitió obtener células antígeno-específicas en cultivos de tejidos con abundancia sobrada para su disponibilidad y empleo en los análisis.

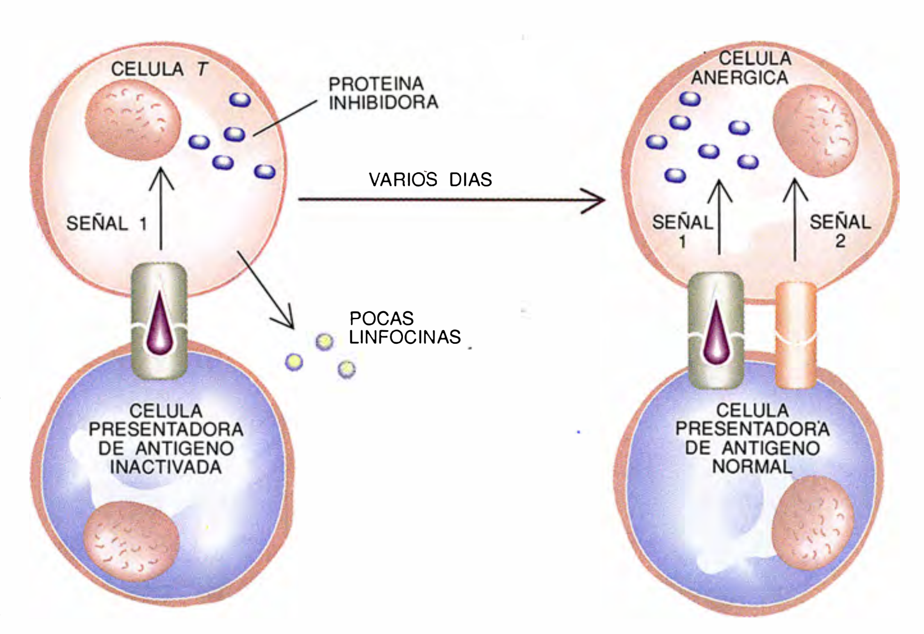
Se comprobó que las células *T* podían estimularse y dividirse, así como sintetizar linfocinas, ante la presentación de antígenos específicos. Pero no bastaba el antígeno solo: las células presentadoras de antígenos también tenían que participar. Con el tiempo terminó por quedar claro que las células adicionales procesaban y presentaban el antígeno ligado a moléculas del MHC y que el receptor de las células *T* no podía reconocer un antígeno en ausencia de una molécula del complejo principal de histocompatibilidad.



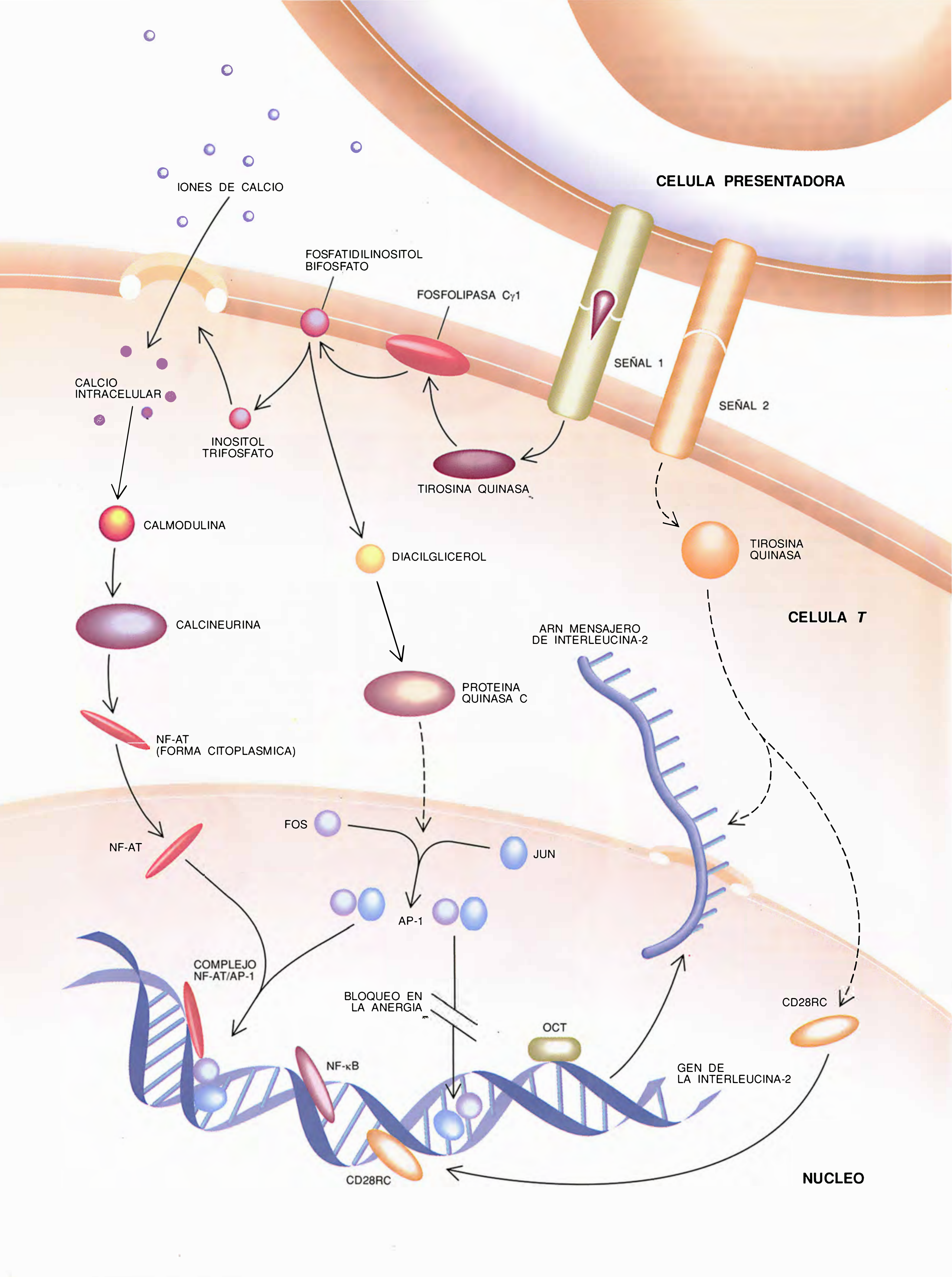
3. EL EXPERIMENTO DE LAS TRES CELULAS demostró que las dos señales esenciales para la activación de las células *T* podían darse por separado. Una de las señales se administró por medio de células, inactivadas químicamente, que presentaban antígenos añadidos desde el exterior. La segunda señal provenía de células que no exponían en su superficie un antígeno ante el que las células *T* reaccionaran. Esa señal resulta de la interacción entre proteínas B7/BB1 de la superficie de las células presentadoras y una molécula receptora CD28 en los linfocitos. (Los dibujos de este artículo han sido realizados por Dimitry Schidlovsky.)

Marc Jenkins y el autor demostraron en el NIAID que las células presentadoras de antígenos portaban la segunda señal crítica. Mediante el empleo de carbodiimida y paraformaldehído, detuvimos *in vitro* el procesamiento de antígenos por parte de las células presentadoras. Llevaban éstas todavía, en su superficie, las moléculas del MHC, razón por la cual podían seguir captando fragmentos de antígenos tratados químicamente, aplicados a las células desde fuera. Las células inactivadas podían, pues, presentar antígenos a los linfocitos *T*. Sin embargo, no activaban clones de células *T* hasta que se añadía otro grupo de células presentadoras que llevaban una molécula del MHC diferente. Puesto que sus moléculas del MHC no podían haberse unido al antígeno correspondiente, tampoco podían haber ofrecido a las células *T* una señal relacionada con el antígeno. Pero sí aportaban una segunda señal, inespecífica.

Este modelo experimental, que convocaba la intervención de tres células, demostraba que la segunda señal podía emitirse de una manera independiente de la señal específica del antígeno. (Normalmente, por supuesto, ambas señales serían presentadas por la misma célula.) En términos moleculares, ese resultado comportaría la participación, mediadora en el acontecimiento, de un segundo sistema de señales, sistema que involucraría a otro receptor instalado en la célula *T* y otra molécula sobre la célula presentadora de antígenos. En los últimos años, diversos laboratorios han venido ofreciendo datos que abonan la hipótesis según la cual el segundo receptor de la célula *T* es la proteína CD28. Un receptor emparentado, el CTLA-4, se expresa también cuando se activa el linfocito *T*. La molécula a la que se unen los receptores es la B7/BB1, proteína que aparece en la superficie de las células presentadoras cuando éstas se activan. En virtud de la interacción, en la célula presentadora, entre receptor de la célula *T* específica de antígeno y molécula del MHC podría forzarse la presencia de B7/BB1 sobre una célula. Se provoca también con otros estímulos; por ejemplo, con sustancias bacterianas, cuyos estímulos podríamos asimilar a los que proporcionan los adyuvan-



4. SE PROVOCA LA INDUCCION ANERGICA cuando se le presenta, a una célula *T*, una señal específica de antígeno sin la coseñal. La célula *T* produce niveles bajos de linfocinas (aunque no interleucina-2) y también una proteína inhibidora. Aunque la célula *T* anérgica reciba luego ambas señales, no se dividirá.



IONES DE CALCIO
CELULA PRESENTADORA
FOSFATIDILINOSITOL BIFOSFATO
FOSFOLIPASA Cγ1
SEÑAL 1
SEÑAL 2
CALCIO INTRACELULAR
INOSITOL TRIFOSFATO
TIROSINA QUINASA
CALMODULINA
DIACILGLICEROL
TIROSINA QUINASA
CALCINEURINA
CELULA T
ARN MENSAJERO DE INTERLEUCINA-2
PROTEINA QUINASA C
NF-AT (FORMA CITOPLASMICA)
FOS
NF-AT
JUN
AP-1
COMPLEJO NF-AT/AP-1
BLOQUEO EN LA ANERGIA
OCT
CD28RC
NF-κB
GEN DE LA INTERLEUCINA-2
CD28RC
NUCLEO

5. VIAS DE SEÑALIZACION implicadas en las respuestas de las células *T* y en la anergia. Se conocen de forma todavía fragmentaria. Cuando una célula *T* recibe una señal antígeno-específica, se activa una enzima tirosina quinasa, que desencadena una cascada de cambios químicos. Entre ellos, la síntesis de los componentes Fos y Jun de la proteína AP-1; resulta también que la proteína NF-AT penetra en el núcleo de la célula, forma un complejo con la AP-1 y se une al gen de la interleucina-2. El complejo NF-AT/AP-1 y los factores OCT y NF-κB son esenciales para la transcripción del gen. La segunda señal parece incrementar la producción de interleucina-2 hasta niveles eficaces. Podría conseguirlo mediante la síntesis del factor de transcripción CD28RC o por estabilización del ARN mensajero transcrito a partir del gen de la interleucina-2. En la anergia, una proteína inhibidora podría bloquear la unión de AP-1 al gen de la interleucina-2.

tes. Nuestro experimento ponía de manifiesto la existencia de todos los elementos esenciales del modelo de doble señal ideado por Lafferty y Cunningham.

Confirmó también la parte más significativa del modelo de Bretscher y Cohn, la de que, por sí misma, la señal asociada con el reconocimiento del antígeno tendría consecuencias negativas para una célula *T*. Las células *T* reconocían los antígenos dispuestos en la superficie de células presentadoras, tratadas de antemano con agentes químicos, y respondían: aumentaban de tamaño y liberaban pequeñas cantidades de ciertas linfocinas. Empero, no producían la linfocina más crítica para la división de las células *T*, la interleucina-2. No sólo eso. Cuando días después se intentó reestimular a los linfocitos *T* utilizando células presentadoras normales que llevasen ambas señales, la específica del antígeno y la segunda, coestimuladora, las células *T* seguían sin dividirse ni producir mucha interleucina-2, amén de haber reducido, en diverso grado, la síntesis de otras linfocinas.

Ese estado de falta de respuesta recibe la denominación de anergia de las células *T*. El término "anergia" —"ausencia de trabajo"— lo había acuñado Sir Gustav Nossal, del Instituto Walter y Eliza Hall de Investigaciones Médicas de Melburne, para describir un estado inactivo, posiblemente análogo, en las células *B*. Nosotros, y otros también, comprobamos que, en cultivo, los clones de células *T* podían seguir vivos en un estado anérgico durante semanas; estudios cuantitativos recientes sugieren, no obstante, que ese estado va decayendo de forma paulatina. La anergia puede revertir en cuanto se administra interleucina-2 a las células *T* para que éstas procedan a su división.

¿De qué modo ocurren, en el plano molecular, la síntesis de interleucinas-2 y la inducción de la anergia? Como Helen Quill demostró en mi laboratorio, cuanto se precisa para dar la primera señal es un antígeno unido a la molécula de MHC. Analizó la secuencia de acontecimientos químicos involucrados en la transducción de esta señal hasta las células *T* sirviéndose de un sistema de membrana lipídica que había desarrollado el equipo de Harden M. McConnell, de la Universidad de Stanford. El receptor específico del antígeno, de una célula *T*, empieza por reconocer un complejo MHC-antígeno y envía señales al interior celular. El efecto inmediato, como demostraron Lawrence E. Samelson, del Instituto Nacional de la Salud Infantil y del Desarrollo Humano, y Arthur Weiss, de la Universidad de California en San Francisco, es la estimulación de una tirosina quinasa, una enzima que añade grupos fosfato ricos en energía al aminoácido tirosina de las proteínas.

Ese episodio inicia una cadena de reacciones químicas. Al añadir un fosfato, la tirosina quinasa activa la enzima fosfolipasa Cγ1, que a su vez descompone el fosfatidifilinositol bifosfato, compuesto de la membrana celular. Uno de los productos de la degradación activa otra enzima, la proteína quinasa C, que añade grupos fosfato a los aminoácidos serina y treonina en otras proteínas. A través de una serie de reacciones, que en su pormenor desconocemos todavía, la acción de la proteína quinasa C desemboca en la síntesis del complejo proteico AP-1.

Mientras tanto, el otro producto de hidrólisis dispara la entrada de iones calcio en el interior de la célula, lo que insta un incremento ulterior de la actividad enzimática. A raíz de ello, el factor nuclear de las células *T* activadas (NF-AT) se modifica de suerte tal que puede emigrar del citoplasma al interior del núcleo. Una vez allí, el NF-AT se une al AP-1 recién sintetizado. Las dos proteínas forman un complejo que se une entonces vigorosamente al ADN vecino de ciertos genes. El motivo de llamar, a esos complejos proteicos nucleares, factores de transcripción estriba en el hecho de que su unión al ADN permite que el gen se transcriba, o se copie, en forma de moléculas de ARN mensajero, que la maquinaria celular traduce posteriormente en nuevas proteínas.

Muchos genes de linfocinas pueden transcribirse con tal de que unos cuantos factores de transcripción se unan a sus regiones de control. El gen de la interleucina-2, sin embargo, parece estar sujeto a una regulación mucho más estricta: no puede transcribirse si no es en la presencia del complejo NF-AT/AP-1, de AP-1 y de otros dos factores de transcripción. Todos los factores deben haberse sintetizado recientemente, o activado químicamente, cuando la célula *T* recibe el estímulo de su receptor antígeno-específico. Más aún, ni siquiera basta la presencia de los cuatro factores de transcripción para que la célula produzca cantidades suficientes de interleucina-2. Se requiere también un estímulo de la segunda señal, que viene mediado por la molécula CD28. Se desconoce la vía bioquímica precisa de este proceso de señalización, aunque trabajos recientes de Carl H. June, del Instituto de Investigaciones Médicas de la Marina, sugieren que el primer paso podría exigir la activación de otra tirosina quinasa.

Los experimentos apuntan hacia dos posibles mecanismos de intensificación de la síntesis de interleucina-2 por parte de la coestimulación. Uno, el sugerido por el grupo de Weiss, consiste en la activación de otro factor de transcripción (CD28RC), que proporciona el componente final que se requiere para la producción de ARN mensajero. El otro, anotado por el laboratorio de Tullia Lindsten de la Universidad de Michigan, reside en la estabilización del ARN mensajero transcrito a partir del gen. En el citoplasma, el ARN mensajero de la interleucina-2 puede degradarse en seguida. Cualquier modificación de la maquinaria que lleva a cabo esta degradación prolongaría la vida del ARN mensajero, lo que a su vez facilitaría la traducción del mensaje en interleucina-2. Cualquiera que sea el mecanismo responsable, una célula no puede producir, sin coestimulación, suficiente interleucina-2 para la división.

En ausencia de coestimulación, hablamos ahora del otro efecto, la célula cae en un estado de anergia. De momento, los expertos han de limitarse a emitir conjeturas sobre los motivos de tal conducta. Sabemos que los fármacos que impiden la síntesis de proteínas bloquean también la inducción de la anergia.

La señal del antígeno, cuando se presenta por sí sola, podría conducir a la producción de una proteína inhibidora. Idea que viene avalada por las investigaciones recientes de nuestro laboratorio en colaboración con el de Michael J. Lenardo, del Instituto Nacional de Alergia y Enfermedades Infecciosas.

Nosotros hemos demostrado que, en las células *T* anérgicas, se debilita la unión del factor de transcripción AP-1 a la región reguladora del gen de la interleucina-2. La proteína inhibidora podría cumplir esa función de varias maneras. Podría bloquear la transcripción de los genes que fabrican las subunidades de AP-1. Podría unirse con el gen de la interleucina-2 y así evitar la unión del factor de transcripción AP-1. El inhibidor podría también modificar químicamente la AP-1, o unirse a ésta, para así evitar que se engarzara con el gen de la interleucina-2. Cualquiera de estos efectos torpedearía la síntesis de interleucina-2.

Importa saber de qué modo la señal coestimuladora evita la inducción de la anergia. De acuerdo con el modelo actual, cuando ambas señales, la antígeno-específica y la coestimuladora, se presentan ante una célula *T*, ésta sintetiza interleucina-2, la cual se une entonces a los receptores de la superficie de la célula *T* y dispara la división celular. El proceso de división por sí mismo u otras señales intracelulares asociadas con la unión de la interleucina-2 parecen bloquear la acción de la proteína inhibidora. Aunque desconocemos los detalles del mecanismo molecular exacto en cuya virtud ocurre dicho fenómeno, podría deberse a que la división de las células diluya la concentración de la proteína inbidora hasta niveles que resulten ya ineficaces.

La investigación inmunológica actual cuenta, entre sus necesidades más apremiantes, la de encontrar modelos animales de anergia de la células *T* que sirvan para determinar si las observaciones descritas en los cultivos de tejidos pueden predicarse de la biología de los linfocitos normales. Hay que resolver, en particular, si la anergia es sólo un fenómeno de retroinhibición para detener las células una vez desencadenada la respuesta inmunitaria, o si se trata, por contra, de un mecanismo importante de inducción de tolerancia.

El grupo dirigido por Susumu Tonegawa, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, ha conseguido un buen modelo animal muy ilustrativo. Por técnicas de ingeniería genética han logrado un ratón en el que casi todos los linfocitos expresan el mismo receptor antigénico. Después lo han cruzado con un ratón que expresa el antígeno para producir una descendencia cuyas células *T* reaccionaran frente a sus propios tejidos. Descubrieron, para su sorpresa, que, al examinar el bazo de los animales de la descendencia, todas las células *T* eran anérgicas. La anergia se parecía a la observada en los clones de células *T* cultivadas: las células se mostraban incapaces de sintetizar interleucina-2 cuando se las estimulaba con el antígeno, aunque sí proliferaban si se añadía interleucina-2. Nos sugieren tales resultados que la anergia de las células *T* forma parte del camino que sigue el sistema inmunitario en la adquisición de la tolerancia para con sus propias moléculas.

¿Cómo emerge la tolerancia, vía anergia, en el cuerpo? Casi todas las células del organismo tienen moléculas del complejo principal de histocompatibilidad. Pero hay células presentadoras especializadas que pueden proporcionar la coestimulación, cosa que a otras les está vedado. Al merodear por los tejidos, las células *T* examinan las moléculas del MHC y los antígenos que allí encuentran. Puede ocurrir que una célula *T* tropiece con un autoantígeno en una célula del organismo y responda ante su presencia. Si esa célula no puede ofrecer la segunda señal esencial —es decir, si no puede expresar la molécula B7/BB1— el linfocito recibirá sólo una señal y entrará en un estado anérgico, y no en un estado de actividad inmunitaria.

Al margen de que la anergia constituya o no un mecanismo fundamental de la inducción de tolerancia, el conocimiento de la bioquímica molecular que la provoca interesa, sin la menor duda, en inmunoterapia. En los trasplantes, los órganos de un donante que porten moléculas del MHC de un tipo se injertan en pacientes que, a menudo, poseen otras moléculas del MHC distintas. Si no se interviene, la incompatibilidad provoca el rechazo del cuerpo extraño por parte del sistema inmunitario del sujeto. Los médicos, para evitar

6. EL RECHAZO DEL INJERTO que puede darse en un trasplante podría evitarse mediante la inducción anérgica de las células *T*. Estas células atacan y destruyen muchos injertos (*arriba*) si no se le administran al paciente fármacos inmunosupresores. Ahora bien, si las sustancias que bloquean la unión de las moléculas B7/BB1 a las células *T* se administraran antes o durante el trasplante, las células *T* no recibirían la segunda señal de activación (*abajo*). Las células, convertidas en anérgicas, no atacarían ya.

el rechazo, suelen administrar fármacos inmunosupresores (por ejemplo, ciclosporina), que suprimen la mayoría de las respuestas inmunitarias, pero dejan al paciente potencialmente vulnerable a graves infecciones. Lo ideal sería suprimir sólo la respuesta inmunitaria dirigida contra el órgano trasplantado.

La inducción de la anergia se nos ofrece como un medio plausible para conseguir ese fin. Durante la operación de trasplante, el equipo quirúrgico podría hacer uso de fármacos que evitasen la coestimulación: fármacos que impidiesen la expresión de B7/BB1, la molécula estimuladora, en las células presentadoras de antígenos, o bloquearan el receptor CD28 de las células *T*. Las células *T* del paciente que, de suyo, atacarían el injerto, recibirían sólo la señal de reconocimiento y se tornarían anérgicas; otras células *T* del organismo ni se enterarían.

El equipo de Jeffrey A. Bluestone, de la Universidad de Chicago, acaba de evitar que los ratones trasplantados rechacen células de islotes pancreáticos humanos. Lo consiguió usando una forma soluble del receptor de CTLA-4, obtenido mediante ingeniería genética por el grupo de Peter S. Lisley, de los laboratorios Bristol-Meyers Squibb, que bloquea las moléculas B7/B1 presentadas en las células. El ensayo indujo también tolerancia en los ratones: los animales aceptaron un segundo injerto del mismo donante humano sin tratamiento adicional. Por otra parte, cuando el grupo de Craig B. Thompson, de la Universidad de Michigan, repitió experimentos semejantes con injertos de corazón en ratas, los tratamientos prolongaron la supervivencia de los injertos, aunque no evitaron el rechazo final.

No se sabe con certeza si el CTLA-4 soluble impide la coestimulación. Además, nuevas células *T* surgen del timo cada día, y pueden rechazar el injerto mientras no hayan abandonado el tejido todas las células presentadoras especializadas. Cabría, pues, que hubiera que prolongar la administración del CTLA-4 soluble y añadir otros agentes bloqueantes para que los pacientes se beneficiaran plenamente de la inducción anérgica.

La terapia fundada en la anergia no tiene por qué limitarse a los trasplantes. Su radio de acción podría cubrir enfermedades autoinmunes, como la diabetes mellitus, la esclerosis múltiple y la artritis reumatoide. Verdad es que, en el caso de la autoinmunidad, la respuesta nociva se ha puesto ya en marcha, mientras que en el tratamiento del rechazo del injerto sería preventivo. Pero la investigación sobre inducción anérgica en clones de células *T* en cultivo demuestra la posibilidad de tornar insensibles los linfocitos activados.

El grupo encabezado por Stephen D. Miller, de la Universidad de Minnesota, ha estudiado un modelo animal de esclerosis múltiple al que se ha dado el nombre de encefalomielitis alérgica experimental. Indujeron la tolerancia frente a antígenos neurológicos en roedores, mediante el acoplamiento químico de los antígenos a las células presentadoras que, a continuación, inyectaban por vía intravenosa. Así lograron detener la forma aguda y las recidivas de la enfermedad. Aunque queda mucho por aclarar en torno a los mecanismos precisos de inducción de tolerancia en estos experimentos, el método seguido, y la merma significativa de la síntesis de interleucina-2, reafirman el papel destacado de la anergia.

La investigación futura sobre la anergia de las células *T* acabará por revelarnos el entramado bioquímico capaz de inducir y mantener ese estado característico de falta de respuesta. Mantengo el optimismo de que algún día conseguiremos activar, de forma selectiva y rutinaria, subpoblaciones de células *T*, dominio que nos llevará de la mano hacia tratamientos nuevos y eficaces en diversos campos de la medicina.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

SPECIFIC INHIBITION OF ANTIBODY PRODUCTION II: PARALYSIS INDUCED IN ADULT MICE BY SMALL QUANTITIES OF PROTEIN ANTIGEN. David Dresser en *Immunology*, vol. 5, n.º 3, págs 378-388; marzo de 1962.

A CELL CULTURE MODEL FOR *T* LYMPHOCYTE CLONAL ANERGY. Ronald H. Schwartz en *Science*, vol. 248, págs. 1349-1356; 15 de junio de 1990.

THE ROLE OF CELL DIVISION IN THE INDUCTION OF CLONAL ANERGY. M. K. Jenkins en *Immunology Today*, vol. 13, n.º 2, págs. 69-73; febrero de 1992.

COSTIMULATION OF *T* LYMPHOCYTES: THE ROLE OF CD28, CTLA-4, AND B7/BB1 IN INTERLEUKIN-2 PRODUCTION AND IMMUNOTHERAPY. Ronald H. Schwartz en *Cell*, vol. 71, n.º 7, págs. 1065-1068; 24 de diciembre de 1992.

IMMUNOLOGIC TOLERANCE. Ronald H. Schwartz en *Fundamental Immunology*, dirigido por William E. Paul. Raven Press (tercera edición en prensa).

Luis Alonso

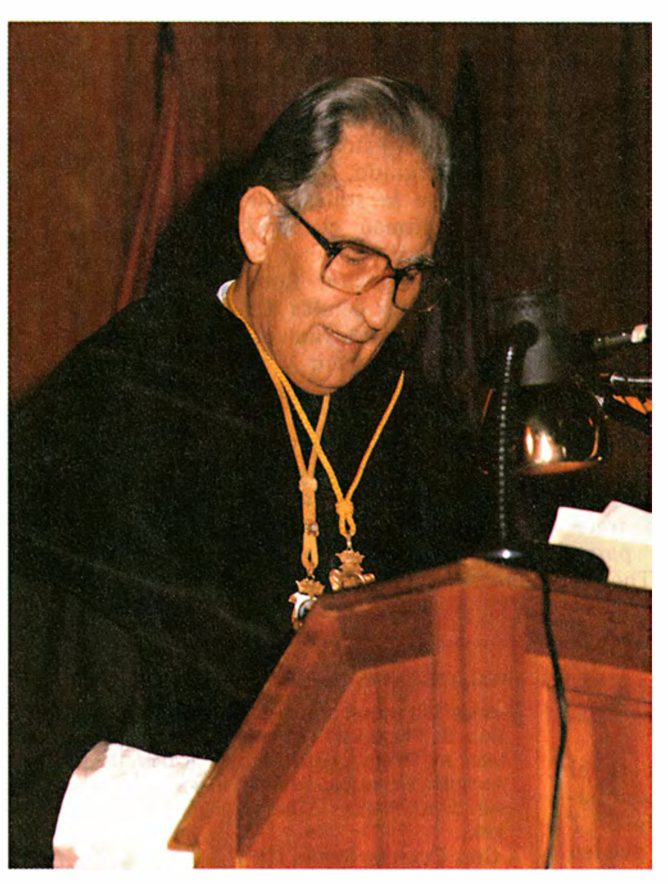
ANTONIO GONZÁLEZ GONZÁLEZ: *endemismo canario*

Canarias ha sabido sacarle partido a su cielo limpio y a su tierra peculiar, con el Instituto de Astrofísica y el Centro de Productos Naturales Orgánicos. Ni uno ni otro serían hoy lo que son, centros de excelencia, sin el empeño de dos hombres: Francisco Sánchez y Antonio González. El segundo, "que ha identificado un extenso número de compuestos metabólicos de vegetales y organismos marinos, realizando estudios sobre su biogénesis, síntesis química y papel biológico", según reconocimiento del jurado que le concedió el Príncipe de Asturias de 1986, constituye nuestra figura protagonista.

Asoma la fuerza y violencia contenida de los tímidos en este químico de andar desgarbado, sonrisa pronta y hechuras magras de galán de posguerra. Algo abandonado: "Antonio —le espetan desde el patio de butacas en la clausura de un congreso internacional de campanillas—, llevas ya hora y cuarto hablando; límpiate la boca." Era Candelaria Izquierdo, Maruxa, su mujer.

Antonio González González cumple este mes de octubre 76 años. Nació en Los Realejos, pueblo labriego del norte de la isla de Tenerife. Hijo y nieto de labradores acomodados, deja entrever a veces el orgullo cazurro, o la socarronería intemperante, de los hombres del campo. En México, con motivo de un simposio, se le acercó Francisco Giral, exiliado español y maestro de una generación de químicos aztecas: "Aquí estábamos preguntándonos de dónde ha podido salir usted." "De Los Realejos", responde González irónico. Giral insiste: "Decíamos que usted no fue discípulo de Medinaveitia [un catedrático afamado de la Universidad Central]. No sabemos de qué escuela procede." Sin perder el aplomo, le replica al hijo del ex presidente de la República Española: "La estamos formando actualmente. Todavía no la conocen los españoles, pero es muy conocida en América por los químicos, especialmente los discípulos del profesor Giral."

Decía la verdad. Casi la verdad entera. Pero no toda la verdad. No procedía de escuela alguna. Y ha formado la mejor escuela de químicos de productos naturales. (Por tales se entiende, sobre todo, los de interés farmacológico, como la quinina, morfina, emetina, digitalina, etcétera.) González ha tenido, sin embargo, un maestro y un amigo: Manuel Lora Tamayo, quien, con José Pascual Vila, puso en los años cuarenta los cimientos de la química orgánica de nuestro país.



Antonio González, creador de la escuela iberoamericana de químicos de productos naturales, transformó en sus años de rector la Universidad de La Laguna

Se licenció en la Universidad de La Laguna en 1940, tras haber participado como sanitario de montaña y mulero en la guerra civil. El hambre acucia y debe subvenir a la familia con clases en centros privados mientras consigue el traslado a Madrid para preparar el doctorado. Lo quiere hacer en química física, con Palacios. Pero el azar le lleva hasta Lora. En 1946 se convocan dos cátedras de química orgánica (Valladolid y La Laguna). Termina la tesis —sobre la síntesis de la ortobromahidrindona y productos relacionados—, oposita y gana.

"Al regresar a La Laguna abandoné la síntesis de moléculas orgánicas porque mi universidad no tenía dinero para comprar los reactivos. Por otra parte, a mí me gustaba mucho la naturaleza y Canarias era muy rica en especies vegetales endémicas, y pensé que sería interesante para mi tierra conocer las posibilidades químicas y farmacológicas de esta flora excepcional. Teníamos la materia prima, pero al avanzar las investigaciones de los productos naturales necesitábamos reactivos tan caros como los que exigía la síntesis. Andando el tiempo, hemos ido conjugando los estudios fitoquímicos con la síntesis de nuevos productos naturales de interés biológico."

El talón de Aquiles de los medicamentos sintéticos reside en los efectos secundarios no deseados. Pero no siempre el producto natural aislado directamente de la planta es el fármaco más adecuado. A veces, una ligera modificación en su estructura refuerza sus propiedades fisiológicas, o se encuentra un alcaloide mejor en una planta común y menospreciada.

Los laboratorios universitarios de la década de los cuarenta reflejan la indigencia en que vive el país. Sin material fungible, sin libros; sin mesas ni bancos. Que las prácticas se hagan depende de la buena voluntad, y del bolsillo, del catedrático. Algunos convierten la necesidad en virtud, Lora entre ellos, investigan e invitan a profesionales extranjeros. Llegado el momento, procuran que salgan los de aquí al exterior. González, que ha venido estudiando terpenos de euforbias canarias, se traslada en 1950 a la Universidad de Cambridge, para trabajar con Alexander R. Todd. Los terpenos, hidrocarburos de origen vegetal y animal, abundan en aceites esenciales y pigmentos en algunas de sus distintas formas principales: monoterpenos ($C_{10}H_{16}$), sesquiterpenos ($C_{15}H_{24}$), diterpenos ($C_{20}H_{32}$), triterpenos ($C_{30}H_{48}$) y tetraterpenos ($C_{40}H_{64}$).

Todd, que recibiría en 1957 el Nobel de química por sus investigaciones en la estructura y síntesis de nucleótidos, nucleósidos y coenzimas nucleotídicos, acaba de lograr la síntesis del trifosfato de adenosina. "En Cambridge trabajé sobre la síntesis de la vitamina B_{12} (cuya estructura desentrañaría Todd poco tiempo después). Mi trabajo principal se centró en el estudio de los triterpenos nuevos que llevé de La Laguna con el instrumental del departamento de química orgánica de Cambridge que Todd puso a mi disposición. Aprendí nuevas técnicas." Coincidió allí con A. J. Birch, descubridor de la reducción que lleva su nombre, y con H. R. Barton, quien recibiría también el Nobel de química por sus trabajos sobre conformación de las moléculas orgánicas iniciados entonces.

Empeñado por esas fechas en la obtención de triterpenos del látex de tabaibas y cardones canarios, alcaloides de diversas plantas (*Adenocarpus* sobre todo) y glicósidos cardioactivos de *Isoplexis*, aísla moléculas que resultarán decisivas en la construcción de la vía biosintética que relacionaba el triterpeno escualeno con el colesterol. Así se abre un hueco en la bibliografía extranjera.

Avanza especie química a especie química con el cuidado exhaustivo del taxonomista. En el estudio de los terpenoides de Compuestas y Umbelíferas canarias, su grupo ha obtenido un centenar largo de lactonas, sustancias de actividad biológica polivalente, desde la anticancerígena hasta la letal por envenamiento del hombre y el ganado.

En un primer contacto, González parece sentirse más orgulloso de su labor organizativa que de su carrera investigadora. Mera pantalla protectora. Sabe que *scripta manent*, que tarde o temprano se irá valorando su impulso a la fitoquímica de la flora macaronésica, modelo adelantado de la vuelta a la farmacia verde que hoy alientan los grandes laboratorios con el caso del taxol como ejemplo arquetípico.

Si remiso a hablar de sus incursiones en los sesquiterpenos procedentes de las algas rojas del género *Laurencia*, por ejemplo, que demanda del interlocutor estar familiarizado con metabolitos secundarios de un mismo esqueleto o con un esqueleto semejante, generados a través de rutas metabólicas diferentes, se muestra locuaz cuando se le nombran dos instituciones: la Universidad de La Laguna y el Centro de Productos Naturales Orgánicos "Antonio González".

Lora, nombrado ministro de Educación Nacional en 1963, le ofreció ese mismo año el rectorado, que ocuparía hasta 1968, al dejar aquél la cartera. González no era afecto al régimen y aquéllos fueron años de particular inquietud estudiantil, de protesta y cursos recortados. Transformó la Universidad de la Laguna. Provinciana y de escasos recursos, los más aceptaban su paso por ella como una suerte de peaje de salida para trasladarse cuanto antes a otra de la península. Estableció nuevas facultades, de ciencias y letras, y puso los cimientos de lo que se convertiría en una universidad politécnica para Canarias.

"Al regresar a La Laguna abandoné la síntesis de moléculas orgánicas porque mi universidad no tenía dinero para comprar los reactivos."

La niña de sus ojos es, sin duda, el Centro de Productos Naturales Orgánicos. La historia burocrática del mismo supera, por su albur y suspense, las coordenadas de la fantasía novelística, con muerte, casi, del protagonista incluida y posterior resurrección, casi, del héroe. Como en otros ejemplos de la ciencia española reciente, el embrión se formó en la cátedra. "Después de reiteradas peticiones, tras haber leído tres tesis doctorales en Madrid y publicado varios trabajos de investigación, el Patronato Juan de la Cierva del CSIC creó una sección de química orgánica, integrada en mi cátedra." La dotación de medios, también como en otras ocasiones, viene de fuera con los trabajos en colaboración; así les llegó un equipo de cromatografía gas-líquido, con detector de estroncio radiactivo y un aparato de infrarrojos, los primeros equipos quizás en entrar en un laboratorio universitario español.

En 1963, la cátedra se prolonga en el Instituto de Química, con laboratorios idóneos que ha recabado del Cabildo Insular y una subvención de 200.000 pesetas anuales. Empieza la trama novelística. La ayuda que viene de instituciones privadas contrasta con el silencio oficial del CSIC. Trabas y más trabas burocráticas para sacarle un duro al ente oficial de investigación. No digamos una plaza de colaborador. Ni soñar en un centro autónomo cuando las cosas se suavizaron y el Instituto de Química trocó, en 1973, su nombre por el de Instituto de Investigaciones Químicas, rebautizado dos años después con otro más acorde a la labor realizada: Instituto de Productos Naturales Orgánicos. Más importante que las piedras de las sucesivas ampliaciones era, obviamente, la resonancia de los trabajos con entrada propia en las obras de referencia de esteroides y materia médica.

La llegada creciente al centro de investigadores de Chile, Argentina, México, Colombia y otras repúblicas de habla española, así como la relación con Brasil (donde estuvo a punto de quedarse si el tirón de la tierruca no hubiera sido más fuerte), le movieron a crear el Instituto Universitario Iberoamericano de Productos Naturales Orgánicos. "Hace más de 20 años que llevamos colaborando con grupos de investigación sobre productos naturales de universidades y centros de Iberoamérica. Nos ha faltado la colaboración del Ministerio de Educación y Ciencia, Instituto de Cooperación Iberoamericano, Comisión de Cooperación Científica y Técnica para el V Centenario, responsables del CSIC."

La ley de incompatibilidades le forzó a abandonar la dirección del Centro, que lleva ahora su nombre, el de un hombre que retiró su candidatura del Premio Príncipe de Asturias por no competir con su amigo y maestro Lora Tamayo. El biógrafo finisecular hubiera destacado, en efecto, su hidalguía; en estos tiempos mostrencos, me quedo con su sonrisa mitad avisada, mitad infantil.

Ciencia y sociedad

Conocimiento por reflexión sísmica

Proyecto ECORS-Pirineos

Se publicó recientemente el informe final del Proyecto Hispano-Francés ECORS para el estudio de la corteza terrestre de los Pirineos. Debía realizar un perfil de sísmica de reflexión vertical profunda a través de la cadena montañosa y de estudios complementarios de apoyo.

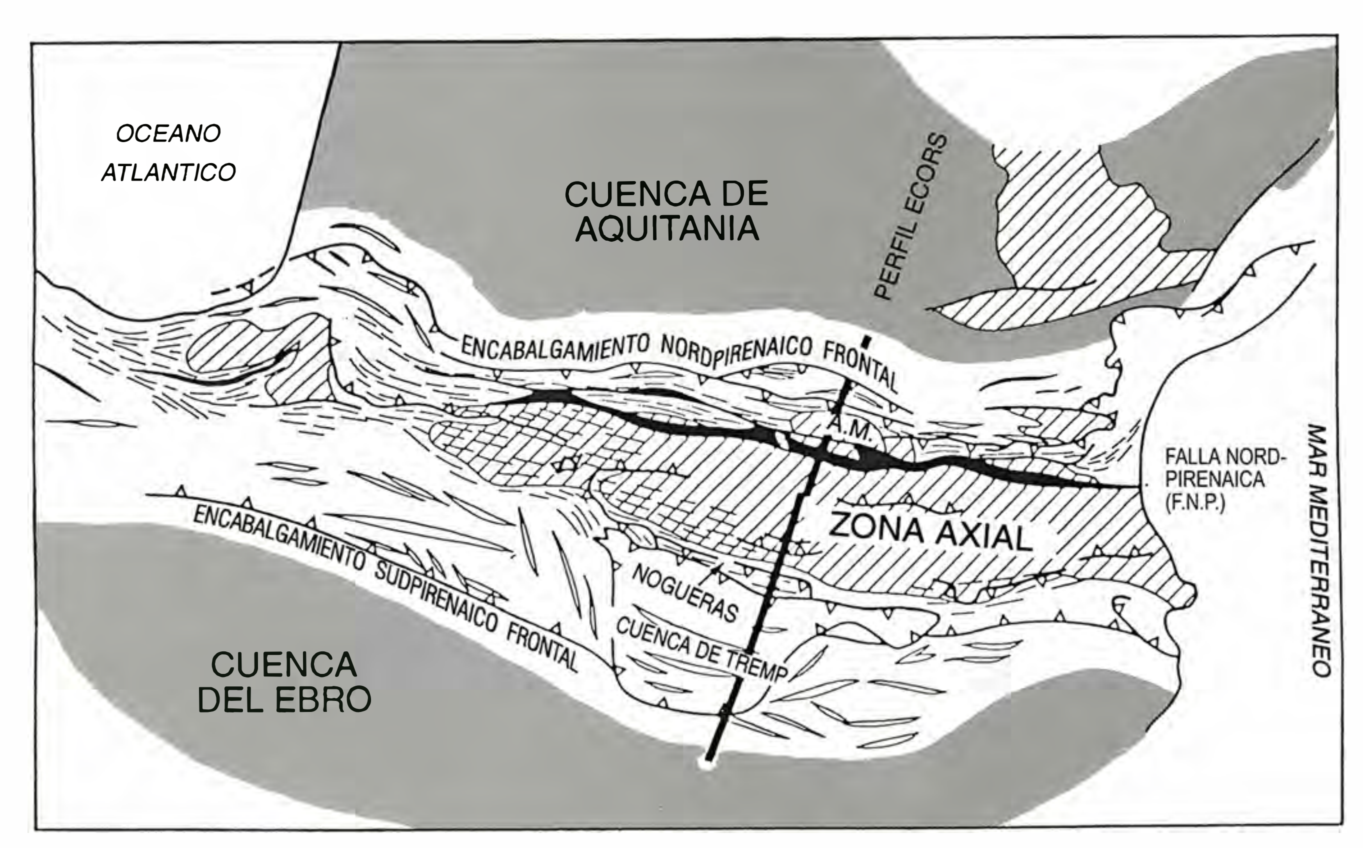
La sísmica de reflexión vertical profunda es una técnica de alta resolución que permite obtener una imagen de los distintos reflectores de la corteza terrestre a lo largo de un perfil o línea. Se trata, en esencia, del examen de la propagación de las ondas sísmicas que, generadas de forma artificial en la superficie, se recogen en ella después de penetrar en la zona de interés. Los estudios de apoyo han consistido en perfiles de sísmica de gran ángulo y gravimétricos que atravesaban la misma zona y zonas próximas a las del perfil principal. La sísmica de gran ángulo, de menor resolución que la de reflexión vertical, permite obtener información sobre la localización en profundidad de los reflectores de la corteza. A partir de los métodos gravimétricos se descubre la distribución de densidades en el interior de la corteza.

El proyecto se llevó a cabo, tras un año de preparativos, durante los otoños de 1985 y 1986. Las instituciones participantes fueron, por parte española, la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología, el Instituto Geográfico Nacional, el Instituto Tecnológico Geominero de España y REPSOL-exploración, y, por parte francesa, el Institut Français du Pétrole, el Institut National des Sciences de l'Univers, la Société Nationale Elf-Aquitaine y la compañía ESSO.

El perfil ECORS supuso, en su momento, una primicia mundial. Por vez primera, una cadena montañosa era atravesada, desde sus extremos no deformados, por un perfil de sísmica de reflexión profunda. Los primeros resultados aparecieron a finales de 1987. Desde entonces y hasta la actualidad los expertos se han dedicado a analizar e interpretar los datos recogidos.

El proyecto ECORS-Pirineos se planteó para obtener una relación entre la estructura profunda de la cadena, conocida hasta ese momento a partir de los datos de sísmica de reflexión de gran ángulo, y las principales características geológicas observadas en la superficie. Esta relación permitiría aclarar las pautas evolutivas de la cadena pirenaica, formada en la orogenia alpina, que tuvo lugar en el período de tiempo comprendido desde hace 70 millones de años (m.a.) hasta hace 20 m.a. Interesaba conocer la prolongación en profundidad de los rasgos de la geología superficial y determinar su importancia en la evolución de la cadena.

El Proyecto ECORS-Pirineos se proponía, sobre todo, desentrañar la geometría profunda de la Falla Nordpirenaica (F.N.P.) y conocer las po-



Proyecto ECORS-Pirineos. El perfil de sísmica profunda ECORS-Pirineos atraviesa la cadena montañosa desde la Cuenca de Aquitania hasta la Cuenca del Ebro. El perfil permite relacionar la estructura profunda de la cadena con los rasgos de la geología superficial, en concreto con la Falla Nordpirenaica. Dentro del proyecto se realizaron también estudios de apoyo complementarios de gravimetría y de sísmica de gran ángulo

sibles diferencias entre las cortezas a ambos lados de ésta. Esta falla, situada en el eje de la cadena, en la denominada Zona Axial, formada por materiales paleozoicos (–580 m.a. - –290 m.a.), es a su vez el eje de la disposición en forma de abanico de materiales mesozoicos (–248 m.a. - –65 m.a.) y paleozoicos. Esta geometría divergente de los materiales, junto con el hecho de que su vertical geográfica coincide con un salto brusco de 15 km en el grosor de la corteza, hacían de la F.N.P. el límite de las placas Ibérica y Europea.

El perfil ECORS-Pirineos, de 250 km de longitud, atraviesa en dirección N-S la cadena pirenaica desde la Cuenca de Aquitania, cerca de Toulouse (Francia), hasta la Cuenca del Ebro, cerca de Balaguer (España). La imagen sísmica obtenida permite resolver algunos de los problemas planteados hasta entonces, pero abre, a su vez, nuevas incógnitas. Aunque la calidad sísmica de la línea es buena, en el centro de ésta, coincidiendo con la Zona Axial y la máxima topografía de la cadena, pierde resolución; por culpa de ello, la estructura en esa zona no queda inequívocamente determinada. Las acciones de apoyo, que aportaron información adicional sobre la distribución espacial de los materiales, fueron eliminando algunos modelos y favorecieron la creación de una imagen coherente de la estructura pirenaica.

La conclusión a que se llega es que la geometría y estructura actual de los Pirineos resulta del acercamiento de las placas Ibérica y Europea durante el Terciario. Como consecuencia del acercamiento, los materiales mesozoicos y su zócalo (paleozoico) fueron comprimidos del orden de unos 100 km en la parte sur y 70 km en la parte norte, hasta formar los Pirineos. Los materiales se dispusieron en la superficie, a ambos lados de la Falla Nordpirenaica, bajo una geometría en abanico, divergente en la parte superior.

Existe asimetría entre las placas Ibérica y Europea. En la primera, la discontinuidad corteza-manto situada a unos 35 km de profundidad se hace más profunda desde el sur hacia el norte, para terminar por debajo de la Zona Axial en una estructura en cuña que alcanza, justo al norte de la traza en superficie de la F.N.P, una profundidad máxima de 60 km. La corteza europea, situada al norte del perfil, con 30 km de espesor, queda interrumpida hacia el sur a la altura de la F.N.P. Estos resultados sobre la geometría de superficie y profundidad, consecuencia del acercamiento de las placas, son aceptados por la mayoría de los expertos. Los modelos discrepantes se basan en el lugar de emplazamiento de la corteza de la placa Ibérica, que se habría consumido en el proceso de convergencia. La discrepancia entre los diversos modelos arranca de las hipótesis dispares sobre la situación y características de las cortezas en un estadio anterior a la convergencia de la cadena y de si este material fue o no engullido por el manto, se encuentra bajo la Zona Axial en la corteza o está distribuido en la corteza Ibérica más allá de la región pirenaica.

En resumen, si bien el Proyecto ha resuelto muchos de los problemas planteados sobre los Pirineos, queda aún un largo camino por recorrer en lo concerniente a la evolución seguida por la cadena. Nadie debe pensar en abordarlo aisladamente. La integración y comparación de los resultados obtenidos en el marco del Proyecto con los obtenidos de estudios similares en otras cadenas montañosas ayudará sin duda a despejar no pocas incógnitas. (*E. Suriñach*, del departamento de geología dinámica, geofísica y paleontología, de la Universidad de Barcelona.)

Lavoisier y Cauchy

Entre escombros y polvo

Cerca de 350 cartas de Lavoisier, cuyo rastro se había perdido hace bastantes años, acaban de unirse a los escritos guardados en los archivos de la Academia de Ciencias de París. Lavoisier murió en el cadalso el 8 de mayo de 1794, víctima de la condena que recayó sobre el cuerpo de recaudadores (los "fermiers généraux"). En 1791, la "Ferme générale", sociedad encargada de recaudar los impuestos especiales sobre el tabaco y la sal —la "gabelle"—, queda abolida; todos sus miembros, detenidos el 24 de diciembre de 1793. Llevados ante el tribunal revolucionario, son condenados y ejecutados. Lavoisier solicita, y se le niega, un plazo de gracia para concluir algunos trabajos. Como comentaría Lagrange, costó un minuto segar su cabeza, pero habrían de pasar cien años antes de que apareciera otra de su talla, si es que ha aparecido.

A su muerte, Marie Anne Pierrette Paulze, su esposa, reunió escritos y correspondencia. Lavoisier había desempeñado múltiples cargos oficiales: administrador de la "Régie des poudres et salpètres" (la administración de pólvoras y salitres), "fermier général", miembro de la Academia de Ciencias y algún cargo público más. Mostró interés por los asuntos sociales y educativos. Sin hijos, Marie Anne Paulze legó los documentos a una sobrina, esposa de Léon de Chazelles.

En 1846, una vez clasificados, catalogados y numerados todos los documentos, Léon de Chazelles donó a la Academia de Ciencias la obra científica de Lavoisier, los escritos relacionados con su vida administrativa, sus reflexiones sobre la instrucción pública y parte de su correspondencia. Se reservó la correspondencia privada y los documentos familiares.

Poco después, Jean Baptiste Dumas, secretario perpetuo de la Academia de Ciencias, comenzó a publicar la obra de Lavoisier, cuyo primer volumen apareció en 1862. Edouard Grimaux, miembro de la Academia, profesor de la Escuela Politécnica y del Instituto de Agronomía, uno de los primeros biógrafos de Lavoisier, sucedió a Dumas al frente de la edición.

En 1955 el primer Comité Lavoisier confió a René Fric, un ingeniero químico, la tarea de publicar íntegramente la correspondencia de Lavoisier. Se le franqueó el acceso al legado Chazelles; mas, para mayor comodidad, se llevó a su casa de Clermont-Ferrand cartas pertenecientes a la Academia. Esta circunstancia parece haber producido alguna confusión entre los dos fondos.

La familia Chabrol, heredera de los Chazelles, entregó, en 1991, la correspondencia privada del sabio que se habían ido reservando de generación en generación. Con la donación, creyóse, se reunía todo el fondo Lavoisier, salvo ciertas cartas que Mme. de Chazelles había vendido a la Universidad de Cornell. La verdad es que faltaban también las sacadas por Fric de la Academia. Pero, ¿dónde estaban? ¿Perdidas para siempre? La edición de las cartas correspondientes al período de 1784 a 1788 presentaba lagunas.

A fines de 1992, un particular comunica que está en posesión... de cartas que parecen haber pertenecido a Lavoisier: una casa en demolición, una pared que se resiste, un armario empotrado abierto, un fajo de documentos que aparece...; el hombre se aproxima, parecen cartas viejas... Tras largas investigaciones, se identifica al autor. Se avisa al Comité Lavoisier. Las cartas son restituidas. La casa en demolición era la de R. Fric, y la correspondencia hallada, la que había sacado de la Academia de

Ciencias y andaba perdida. A ella han vuelto 214 minutas (o borradores), 87 cartas dirigidas al químico y 45 documentos diversos.

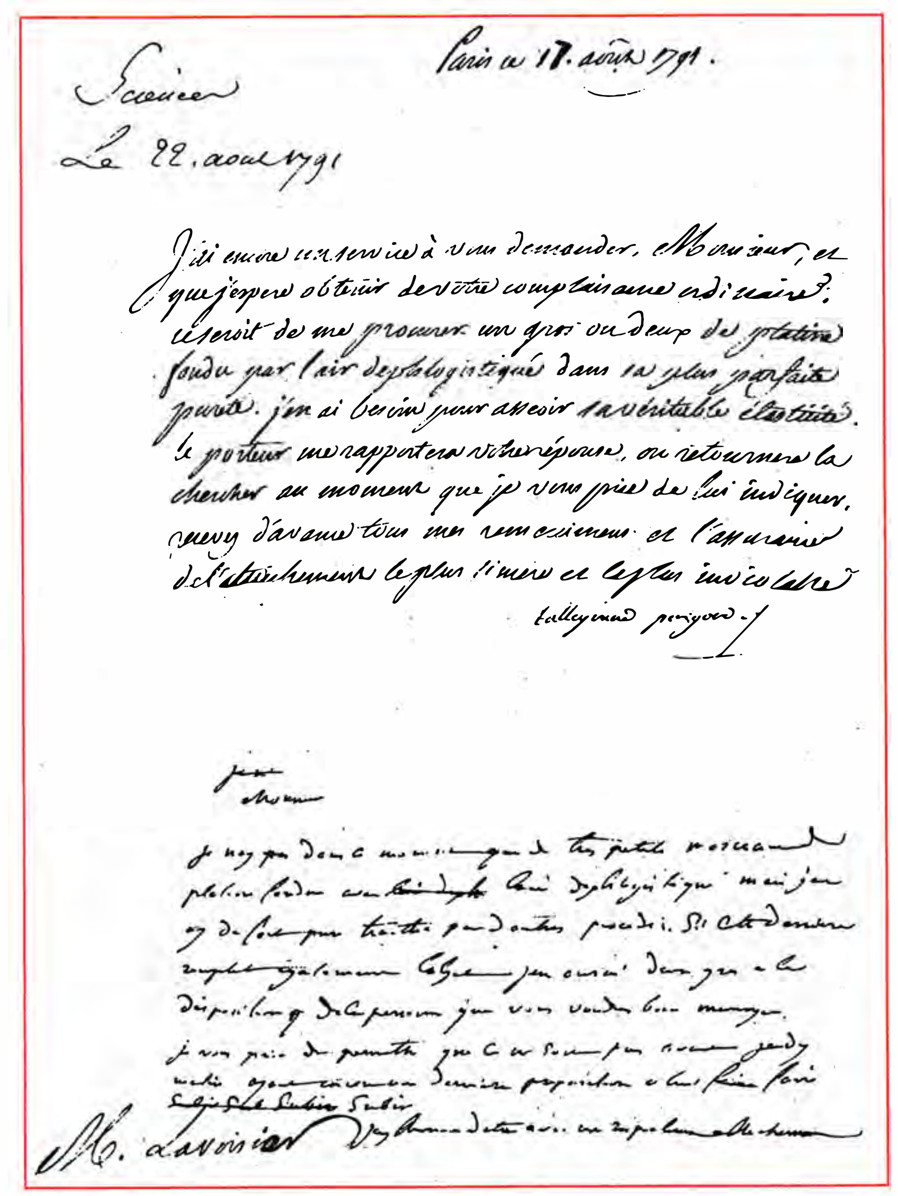
La tenacidad del historiador de la ciencia no deja cancha al azar. Se ha encontrado el curso de Cauchy sobre ecuaciones diferenciales, del que se desconocía que hubiera llegado a la imprenta. Pero Christian Gilain, historiador de la matemática, estaba convencido de que dormía en alguna parte. Cauchy, el primero en establecer una teoría rigurosa de las ecuaciones diferenciales, fue profesor de la Escuela Politécnica. Constaba que había enseñado su método a los estudiantes de segundo curso, método que había pervivido a través de un escueto resumen que Cauchy escribió en 1836 y a través de las lecciones del Padre Moigne, quien en 1844 hizo una exposición inspirada en los cursos de Cauchy.

Otros matemáticos completaron y perfeccionaron la teoría de Cauchy en las postrimerías del siglo pasado. Pero, ¿cuál era el contenido original de la teoría de las ecuaciones diferenciales? ¿En qué dirección iba mejorando con los años el método? Para averiguarlo se precisaba documentación propia, en particular el texto de las lecciones impartidas en la Escuela Politécnica. El curso de primero había sido publicado, pero el de segundo año no figuraba en las *Obras completas.*

Pero ese volumen, ¿nonato?, recogía la única exposición sistemática personal de su teoría de las ecuaciones diferenciales. En sus propias palabras: "El primer, y tal vez hasta aquí único, método para resolver un sistema cualquiera de ecuaciones diferenciales es, me parece, el que he publicado en las *Lecciones de segundo año para la Escuela Real Politécnica.*" De lo que se desprendía que el curso había sido impreso. A mayor abundamiento, el consejo rector de la Escuela Politécnica había solicitado, a los profesores de análisis, que, para mayor aprovechamiento del alumnado, redactasen al menos aquella parte de sus cursos que no figurase en las obras clásicas.

La pesquisa histórica condujo hasta las bibliotecas del Instituto de Francia y de la Escuela de Ingenieros de Caminos. En la librería de ésta se encontró un ejemplar donde figuran las nueve primeras lecciones. Había pertenecido al director del centro. El que se halló en el Instituto de Francia es más completo. Contiene, en forma de pruebas de imprenta,





Paris ce 17. avril 1791.

Ecrire

Le 22. avril 1791

J'ai encore un service à vous demander, Monsieur, et que j'espère obtenir de votre complaisance ordinaire: ce serait de me procurer un gros ou deux de platine fondu par l'air dephlogistiqué dans sa plus parfaite pureté. j'en ai besoin pour asseoir sa véritable élasticité. le porteur me rapportera votre réponse, ou retournera la chercher au moment que je vous prie de lui indiquer. recevez d'avance tous mes remerciemens et l'assurance de l'attachement le plus sincère et le plus inviolable

Talleyrand perigord

[illegible]

M. Lavoisier

*Entre la correspondencia de Lavoisier recientemente encontrada destaca una carta de Talleyrand: "Tengo todavía un servicio que demandaros, Señor, y que espero obtener de vuestra acostumbrada amabilidad. Sería el de procurarme un 'gros' o dos de platino fundido [*1 gros = 3,82 gramos*] por aire deflogistizado (oxígeno) en su más perfecta pureza. Lo necesito para establecer su verdadera elasticidad. El portador me traerá vuestra respuesta o volverá a buscarla en el momento que os ruego le indiquéis. Recibid anticipadamente mi agradecimiento y la seguridad de mi devoción más sincera e inviolable. Talleyrand-Périgord." Figura también la respuesta de Lavoisier: "Señor: en estos momentos sólo dispongo de trozos muy pequeños de platino fundido con aire deflogistizado, pero lo tengo muy puro tratado por otros procedimientos. Si éste satisface igualmente la petición, pondría dos 'gros' a la disposición de la persona que tengáis a bien enviarme. Os ruego que esto no sea antes del jueves por la mañana, pues he de someterlo a una última preparación. Tengo el honor de ponerme a vuestra disposición con mi más respetuosa devoción. M. Lavoisier." (Archivos de la Academia de Ciencias)*

COURS D'ANALYSE. 97

particulière, l'équation (1), il suffit d'examiner si la valeur de l'intégrale définie singulière

$$(11) \qquad \int_\alpha^\beta \frac{dy}{f(x,y)},$$

est ou n'est pas une quantité infiniment petite, x étant considérée comme constante, et α, β désignant deux limites infiniment petites de y, entre lesquelles la fonction $f(x,y)$ ne change pas de signe.

Si l'on considère, par exemple, les équations différentielles

$$(24) \qquad dy = \left(\frac{y}{x}\right)^{\frac{1}{2}} dx, \qquad (25) \qquad dy = y\,l(y).dx,$$

déjà traitées dans la leçon précédente, on trouvera que l'intégrale (11) se réduit, pour l'équation (24), à la quantité infiniment petite

$$(26) \qquad \int_\alpha^\beta \left(\frac{x}{y}\right)^{\frac{2}{2}} dy = 2x^{\frac{1}{2}}\left(\beta^{\frac{1}{2}} - \alpha^{\frac{1}{2}}\right),$$

et, pour l'équation (25), à l'expression

$$(27) \qquad \int_\alpha^\beta \frac{dy}{y\,l(y)} = l\left[\frac{l(\beta)}{l(\alpha)}\right]$$

qui converge vers une limite indéterminée, tandis que α et β convergent vers la limite zéro. Par conséquent, il résulte du corollaire ci-dessus énoncé que la formule $y=0$ vérifie comme intégrale singulière l'équation (24), et comme intégrale particulière, l'équation (25).



Este ejemplar del curso de segundo año de Cauchy es una prueba de imprenta encontrada en el Instituto de Francia. El matemático había pedido la corrección de errores de esta primera impresión. Así, en la igualdad (26), la razón (x/y) figura elevada a la potencia 2/2, en vez de a 1/2. Sin embargo, no parece que la obra se publicase ulteriormente

cuatro lecciones suplementarias; se trata del ejemplar que Cauchy habría ofrecido a la Academia.

¿Por qué Cauchy nunca publicó íntegramente su curso de segundo año? Según Ch. Gilain, la dirección de la Escuela Politécnica recomendaba que los profesores de análisis simplificaran sus métodos. A Cauchy se le sugirió que cinco lecciones dedicadas a consideraciones generales sobre la integración "podían ser convenientes en la Facultad de Ciencias, pero no en la Escuela Politécnica, donde el tiempo apremia a los alumnos". Ante esa situación, Cauchy terminó por ceder, lo que afectó a la redacción de las lecciones.

¿Cómo pudo escapárseles a los editores de las *Obras completas* este documento impreso, conservado en una biblioteca de extenso fondo cauchiano? Se fiaron del plan de las obras establecido por el primer biógrafo y por la Academia. Sólo la investigación de un aspecto teórico preciso podía hacer salir a los estudiosos de la trampa de un estudio falsamente exhaustivo de los archivos del matemático.

Manuscritos extraviados, correspondencias volatilizadas, obras olvidadas... Para asegurarse de que la correspondencia de los sabios contemporáneos no sufrirá estos azares, los archiveros intentan reunir los manuscritos de los científicos de renombre. En Inglaterra, por ejemplo, un comité recoge, todos los años, de sus herederos, la correspondencia de una decena de los sabios más eminentes que hayan fallecido ese año. Estos manuscritos son inmediatamente almacenados a la espera de que un historiador de la ciencia los examine algún día.

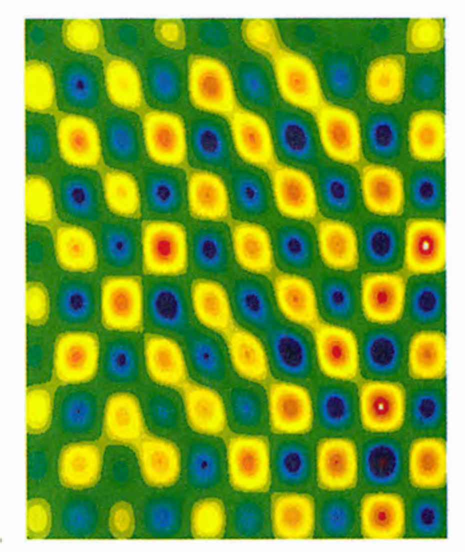
Turbulencia bidimensional

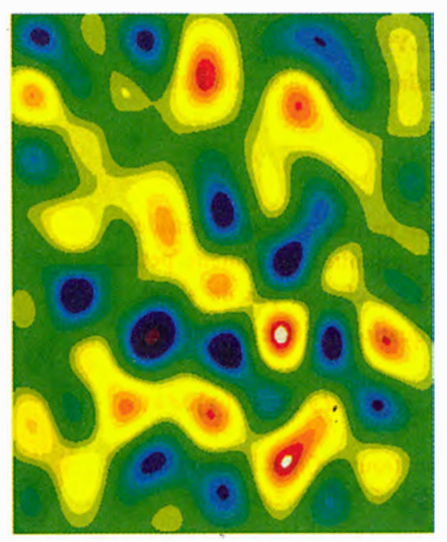
La mezcla de torbellinos en un fluido conductor

Los físicos a menudo simplifican los sistemas que estudian, lo que en ocasiones les lleva a suponer que evolucionan en un mundo de sólo dos dimensiones. La circulación de fluidos tiene lugar en tres, pero no es absurdo pensar que, en ciertos casos, sólo cuentan dos de las direcciones del espacio. Esa circunstancia parece darse en los movimientos de la atmósfera, que se desarrollan en capas de aire muy delgadas. Los objetos activos de la circulación atmosférica, el anticiclón de las Azores, por ejemplo, se extienden a través de miles de kilómetros; su espesor, en cambio, no sobrepasa los diez. Cabe prescindir, pues, de una dimensión del espacio (la vertical); se define así una forma particular de turbulencia: la bidimensional. Ha sido intensamente estudiada en los últimos años, sobre todo con ordenadores. La reproducción de circulaciones realistas ya es posible desde hace algún tiempo.

Uno de los problemas más investigados es el concerniente al decaimiento de la turbulencia. Dejemos evolucionar libremente un sistema turbulento bidimensional donde, en un principio, abunden los torbellinos: los que giren en un mismo sentido se fundirán formando torbellinos mayores; éstos, a su vez, harán lo propio, y así sucesivamente hasta que no subsista más que un gran torbellino. Es controvertida la descripción teórica de este fenómeno. Hace 24 años, un hidrodinámico inglés, George Batchelor, propuso que los torbellinos llenaban durante el fenómeno todo el espacio disponible, y que su número decrecía en función del cuadrado del inverso del tiempo.

Sin embargo, las simulaciones informáticas muestran que esas leyes no se cumplen. Un grupo de investigadores franceses y norteamericanos (G. Carnevale, J. McWilliams, Y. Pomeau, Y. Weiss y W. Young) ha postulado por esa razón otra teoría, según la cual los torbellinos no ocupan sino parcialmente el espacio, debido a que, tras cada fusión, se arrancan y diluyen fragmentos en el





Evolución de una población de 100 torbellinos. Los colores expresan los niveles de vorticidad, es decir, de la rotación local del fluido. Durante el decaimiento de la turbulencia se forman progresivamente grandes estructuras

espacio que media entre los torbellinos. Las leyes físicas que de ello se derivan difieren de las establecidas por Batchelor: el número de torbellinos decrece, según esta otra teoría, con la potencia –0,7 del tiempo.

Hemos medido experimentalmente el exponente de la ley de decrecimiento de los torbellinos en una capa delgada (de dos a tres milímetros de espesor) de fluido conductor contenida en una cuba de ocho centímetros de lado. Poníamos el fluido en movimiento con fuerzas electromagnéticas. Una corriente eléctrica atravesaba el fluido en paralelo a un lado del cuadrado; debajo de la cuba había dispuesta una red regular de 100 imanes permanentes de manera que los polos fuesen alternos. De esta forma el fluido quedaba sujeto a un campo magnético orientado perpendicularmente a la cuba y que se invertía cada ocho milímetros.

Ese campo magnético se acoplaba a la corriente eléctrica para engendrar una fuerza paralela al plano de la capa, que se invertía cuando el campo lo hacía. Se generaba así una circulación en forma de red turbulenta constituida por 100 torbellinos. El experimento consistía en cortar la corriente eléctrica una vez formada la red y observar cómo evolucionaba la turbulencia. Vimos, en efecto, la fusión de torbellinos del mismo signo y su rarefacción a lo largo del tiempo. La fusión se producía en décimas de segundo; no llegaba a cinco segundos la duración completa del experimento. Pasado ese tiempo, sólo quedaban unos pocos torbellinos grandes, que las fuerzas de fricción del fluido con la pared del fondo se encargaban de ir eliminando.

Pues bien: las dos teorías propuestas describen mal los efectos que observamos. La discrepancia salió a la luz gracias a una técnica de tratamiento de imágenes. Hicimos visible la circulación por medio de partículas depositadas en la superficie libre del fluido; la velocidad y la vorticidad (la rotación del fluido) en cada punto se calculaban a partir de la comparación de imágenes sucesivas.

Obtuvimos que durante la fase de decaimiento de la turbulencia, tal y como pensaba Batchelor, los torbellinos llenan todo el espacio, pero las leyes físicas que caracterizan el fenómeno son diferentes de las que él propuso: el exponente de la ley de decrecimiento del número de torbellinos en función del tiempo parece que es del orden de –0,4, no –2. El experimento tampoco concuerda con la teoría de Y. Pomeau y sus colegas: el hecho de que los torbellinos llenen todo el espacio a lo largo de la fase de decaimiento es contrario a ella, y los exponentes observados no coinciden con los que predice.

El experimento, pues, lejos de aclarar las cosas, ha aportado hechos nuevos que los marcos teóricos hasta ahora postulados no explican. Nuestra prueba sólo fue imperfectamente bidimensional ("casi bidimensional"), y es muy probable que haya que tener en cuenta las condiciones iniciales o la viscosidad en la interpretación de los resultados. Sin embargo, aunque nada se haya resuelto, es digno de tenerse en cuenta que un problema básico, el del decaimiento espontáneo, carezca de descripción teórica. (*P. Tabeling*, *O. Cardoso* y *D. Marteau*, de la Ecole Normale Supérieure de París.)

Los límites de la normalidad

¿Puede ser un error tratar de "arreglar" una minusvalía?

Jeremy Scharf, de cuatro años, es travieso y extravertido. También es sordo profundo. Sin embargo, desde el pasado mes de marzo, cuando los médicos de la Facultad de Medicina Johns Hopkins implantaron un dispositivo electrónico en su oído izquierdo, se ha convertido en un insaciable aficionado al canto de los pájaros y a las cajas de música. El implante asume las funciones de la cóclea, el órgano que debería enviar las señales a su nervio auditivo y que él tiene dañada.

Visto desde fuera, es posible que la disponibilidad de estos aparatos se considere una verdadera bendición. Pero muchas personas sordas o con otras minusvalías se lamentan de que los intentos de "reparar" médicamente su condición están a menudo mal planteados y hasta resultan peligrosos. Para Nancy Bloch, directora de la Asociación Nacional de Sordos (ANS), los implantes cocleares para niños están tan poco probados que su uso podría calificarse de "experimentación médica: así de sórdido".

Lee Kitchens, presidente de la Fundación Internacional del Crecimiento y ex presidente de la organización Gente Pequeña de América, tiene palabras de similar dureza para las terapéuticas quirúrgicas encaminadas a hacer más altos a los enanos: "En lugar de modificar el ambiente para que se adapte a las personas, tratan de modificar a los interesados: una solución estúpida."

Queda por determinar si la sordera, el enanismo y otras minusvalías deben considerarse patologías o parte del espectro normal de variación humana. En el centro de la polémica se hallan los niños de corta edad, cuyos padres son los que toman las decisiones pertinentes. Como es natural, quieren lo mejor para sus hijos (y, lógicamente, lo mejor suele significar que se parezcan lo más posible a ellos). Les preocupa, por ejemplo, que sus hijos sordos no puedan oír el ruido de coches que se les acercan, u otros sonidos que adviertan de un peligro. "Cuando Louis era muy pequeño, le mordió un perro a quien oyó ladrar", dice Judy Weiss, de Bethesda, cuyo hijo fue uno de los primeros niños a quienes se colocó un implante coclear, hace 11 años. Temen los padres que sus hijos sordos encuentren cerradas las puertas de la vida social y laboral si su

lengua propia es el lenguaje de los signos y no la lengua hablada.

Robert Shannon, director del Instituto de Investigaciones Auditivas de Los Angeles, avanzadilla en el campo de la implantación coclear, cree que el público debe entender mejor las necesidades y aptitudes de los sordos, pero también considera importante que las personas sean libres para elegir. "Si hay alguna forma en que podamos resolver sus problemas auditivos, ¿por qué debemos ignorarla? Si yo tuviera un problema de visión y alguien me ofreciera unas gafas, no dudaría en ponérmelas."

Nadie duda del beneficio obtenido por algunos receptores de los implantes. Según los padres de Jeremy, su habla ha ido mejorando, y no piensan enseñarle el lenguaje de los signos. Louis se comunica con su familia hablando y por medio de una forma de lenguaje de signos denominada "habla apuntada" (*cued speech*); en el colegio, habla y lee los labios. Louis, cuenta su madre, se ha integrado muy bien en la escuela, donde cursa el octavo con sobresalientes y acaba de recibir un premio por su excelente rendimiento en español.

Pero no todos los implantados han conocido igual fortuna. Ni siquiera en los mejores casos confieren estos dispositivos una capacidad auditiva normal. Defensores y detractores coinciden en que sólo alrededor del 20 por ciento de los receptores de implantes oyen lo bastante bien como para entender la práctica totalidad de las frases habladas y usar el teléfono sin dificultad. Quizás un porcentaje semejante no obtenga apenas beneficio alguno. La mayoría de los receptores se hallan en un punto intermedio: en grados variables, los sonidos que oyen les permiten complementar lo que obtienen de la lectura de los labios y de su conocimiento del ambiente. En general, los implantes funcionan mejor en quienes han perdido el oído cuando ya sabían hablar.

Harlan Lane, de la Universidad del Nordeste, preside el grupo de estudio del implante coclear de la ANS. No es sordo. En su opinión, la poca fiabilidad de los implantes los hace peligrosos porque "existe el riesgo de que el niño acabe en tierra de nadie". Si el niño tiene poca capacidad auditiva y de habla, seguirá estando en una situación de grave desventaja en la comunidad oyente. Por otra parte, sin conocer el lenguaje de los signos, será también un extraño entre los sordos.

"Hay algo irrebatible: la Administración de Alimentos y Fármacos (AAF) no consultó con ningún sordo cuando decidió autorizar, en 1991, la aplicación del implante a los niños", dice Lane. "Me parece algo escandaloso." Considera que la docena de estudios realizados para demostrar la eficacia de los implantes en los niños adolecen de defectos metodológicos, y deplora que no se haya investigado la influencia que los implantes pueden tener en su desarrollo psicológico. Al ignorar estos aspectos, indica Lane, las instituciones médicas tratan "al niño sordo como si no fuera más que un oído".

Los sordos sostienen que están tan extendidas ideas falsas sobre ellos que la mayoría de los padres carecen de información adecuada a la hora de tomar decisiones tocantes al mundo del sordo. "Muchos sordos participan de ambos mundos", dice Bloch. Casi todos pasan la mayor parte de su tiempo rodeados de gente que oye. Muchas personas con minusvalías auditivas pueden incluso utilizar en cierta medida el teléfono. Los teclados y pantallas de teletipo conectados al teléfono, el correo electrónico y las máquinas de fax hacen posible que hasta personas con una profunda sordera se comuniquen por cable.



El implante coclear proporciona a Louis Weiss algo de capacidad auditiva, pero muchos sordos afirman que tales dispositivos no han pasado suficientes pruebas experimentales

"Nos consideramos más un grupo cultural que una anomalía médica", explica Bloch; y como tal, tienen derecho al respeto debido a cualquier minoría étnica, cultural o religiosa. Los sordos tienen su idioma, sus costumbres y su historia propios; por desgracia, los analfabetos en el lenguaje de los signos no pueden apreciar la elocuencia con que se expresan. Puesto que el verdadero problema de los sordos es el de la comunicación, afirma Bloch, debería resolverse con un remedio social, no mediante una solución médica.

Como los sordos, muchas personas pequeñas están a menudo en desacuerdo con las decisiones de los padres. Según Campbell Howard, endocrinólogo y presidente del consejo de la Fundación Crecimiento Humano, la gente pequeña adulta no ve la necesidad de cambiar la talla de los niños bajos. No obstante, añade, "muchos padres vienen a mí buscando algo que haga más altos a sus hijos. Perciben un problema".

Según Kitchens, nada altera más a las personas de poca estatura que los intentos "artificiales" de hacerlas más altas. Es muy crítico con la cirugía de alargamiento de los miembros, en la que se rompen una y otra vez los huesos largos de los niños enanos para estimular su crecimiento, porque el procedimiento, doloroso, no está exento de riesgos y es de eficacia limitada. Algunas formas de enanismo se deben a la carencia de la hormona del crecimiento. Los médicos pueden hacer que esos niños crezcan inyectándoles un sustituto hormonal sintético. Desde el punto de vista de Kitchens, no hay nada que reprochar a esta terapéutica, "muy semejante a la administración de insulina a personas cuyo páncreas no funciona bien. Pero en el caso de alguien que mide 90 cm unos pocos centímetros más no van a representar una gran diferencia. La irritación provocada por los pinchazos puede ser peor, desde un punto de vista psicológico, que perder lo que se pueda conseguir".

Conforme vayan evolucionando la ingeniería genética y la tecnología médica, las posibilidades de alterar las características físicas y mentales no harán sino aumentar. Las decisiones que se tomen vendrán definidas sin duda alguna por inquietudes sociales y culturales: ¿Qué es normal? ¿Qué es deseable? Pero la disponibilidad de una técnica puede moldear sutilmente las actitudes. Sin ir más lejos, el uso de la hormona del crecimiento está autorizado sólo para aumentar la talla de las personas con enanismo de origen hormonal, pero, según Howard, muchos padres presionan a los médicos para que la prescriban a niños cuya estatura es sólo menor que la media. Nadie sabe todavía, apostilla, si la talla de estos niños hormonalmente normales aumentará de forma significativa o cuáles podrán ser los efectos colaterales a largo plazo. (*John Rennie.*)

De cerca

Fotos y texto: Satoshi Kuribayashi

Sámaras como hélices



El centenar escaso de árboles y arbustos que componen la familia de las aceráceas poseen una madera apreciada para carpintería fina en Japón y China, que en nada desmerece la de los hermosos ejemplares de los arces españoles. Al de la península y las Baleares, por cierto, los botánicos le denominan *Acer monspessulanum* L., que quiere decir de Montpellier.

Los arces, lo mismo que los olmos, poseen frutos alados. Doble ala de unos seis o siete centímetros presentan las sámaras de los primeros. El ángulo que forman tales apéndices sirve para distinguir unas especies de otras. Las hay que dibujan un ángulo recto, otras un ángulo obtuso o ángulo agudo que se cierra tanto a veces, que parecen paralelas. El ala, además de retrasar la caída del fruto, permite su diseminación por lugares no colonizados todavía.

¿Ha visto el lector alguna vez ese prodigio aerodinámico que es la caída de la disámara? Yo me quedé tan prendido que no me resistí a recogerla en imágenes. La fotografía central sorprende la rotación del fruto en luz halógena; la de su derecha está tomada bajo iluminación continua con flash electrónico a 45 grados desde la base. El intervalo de iluminación emitida por el flash electrónico era de 0,01 segundos, lo que significa que el movimiento realizado en 0,2 segundos se ha plasmado en 20 imágenes.



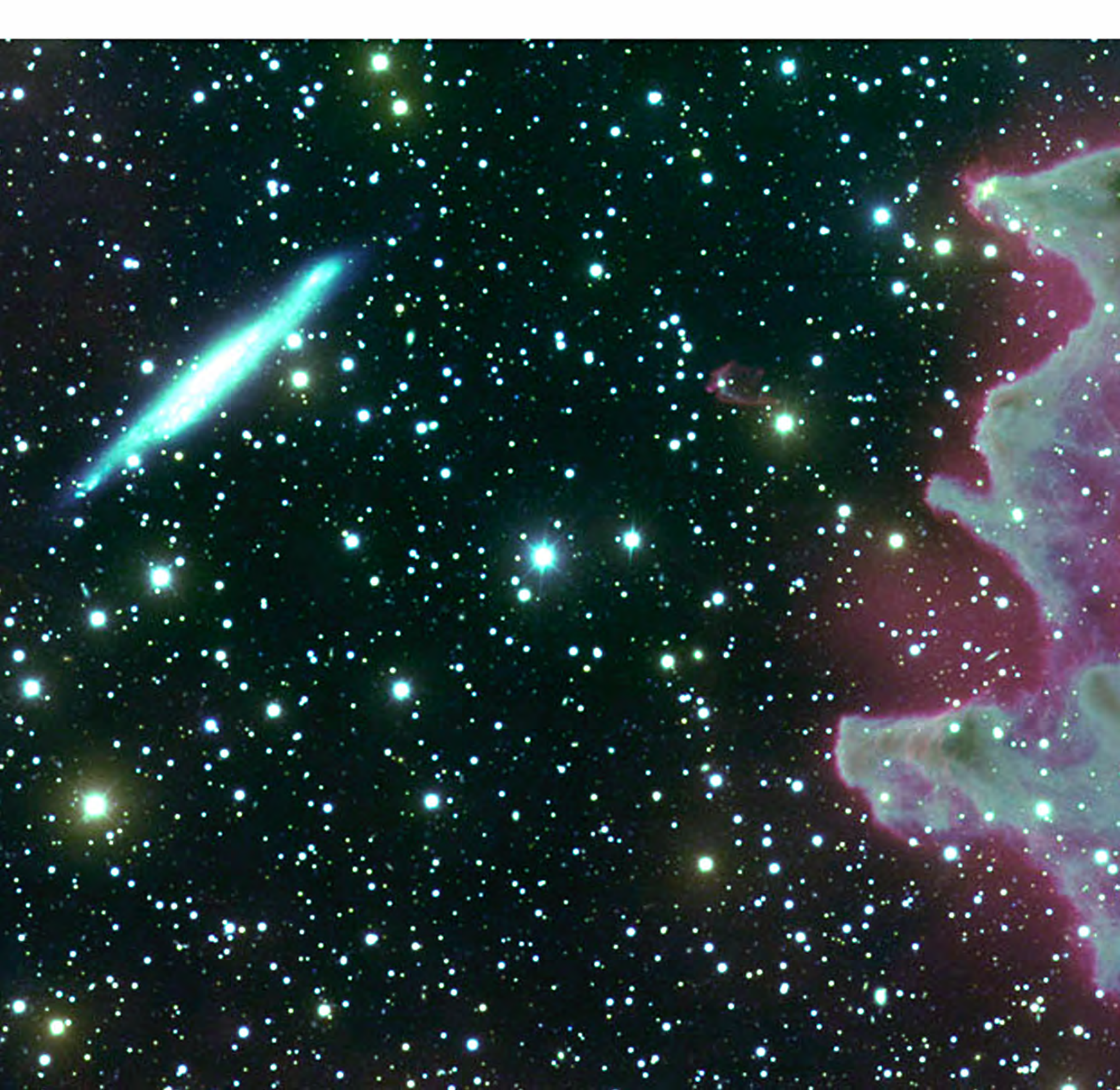
Foto de la derecha
distancia focal: 125 mm
diafragma: F = 11
exposición: 1/2000 de segundo
película: ISO = 200



Un universo de color

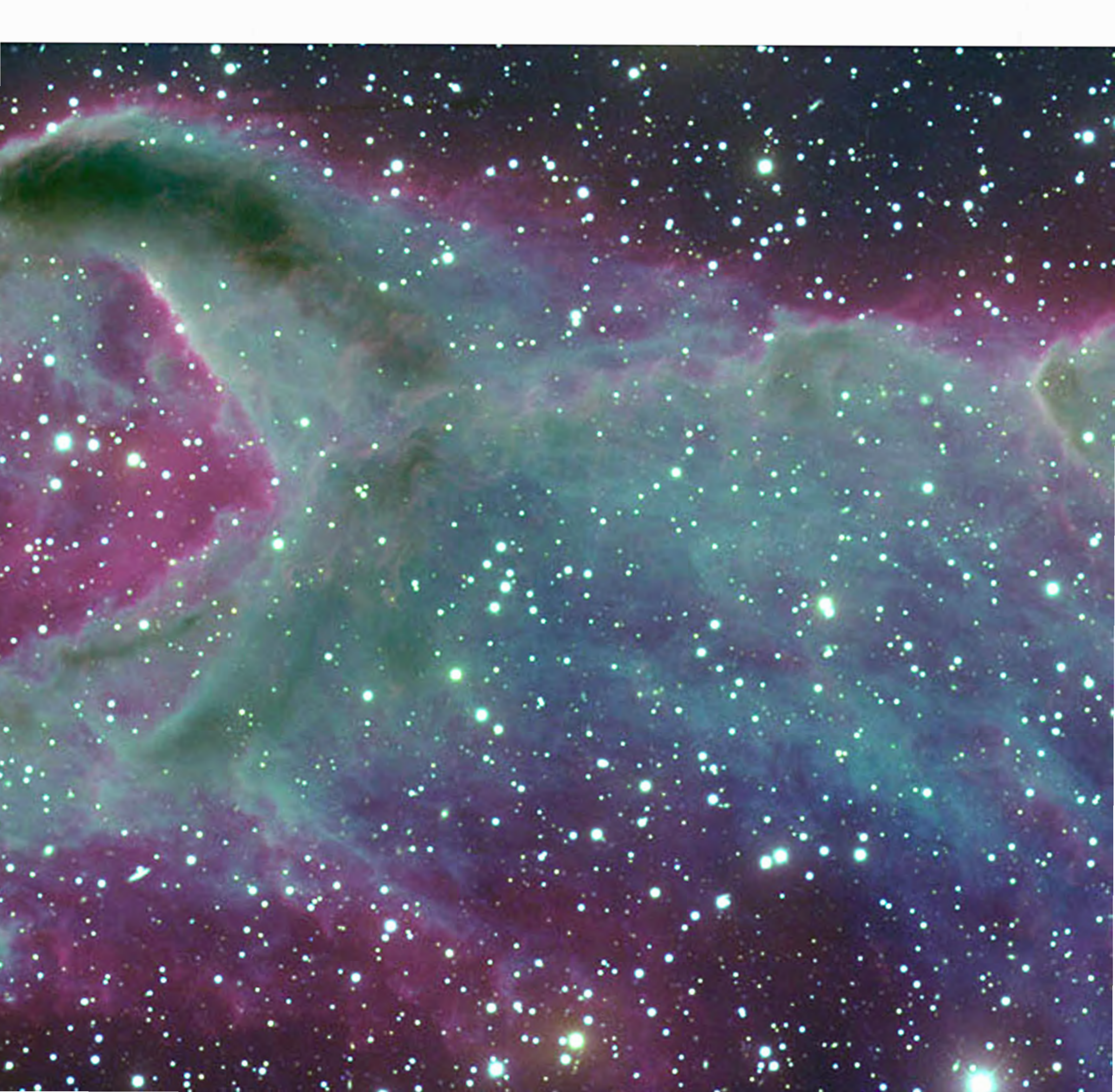
La fotografía en color sigue siendo una herramienta astronómica importante, capaz de revelar detalles de los objetos celestes que los detectores electrónicos no pueden captar todavía

David F. Malin



En los 150 años que han transcurrido desde que se realizó el primer daguerrotipo de la Luna, la fotografía se convirtió en una herramienta indispensable de la astronomía. Pero la asociación entre ambas ha empezado a disolverse en los últimos años, tiempo en el que muchos astrónomos han optado por los dispositivos de carga acoplada (DCA; también CCD, del inglés "Charge Coupled Devices"); estos detectores electrónicos recogen la luz mucho mejor que las fotografías. Pero el viejo procedimiento no es igualado por los DCA en su capacidad de registrar rasgos finísimos y de plasmar con precisión el color de zonas muy amplias. Tales virtudes resaltan en las fotografías en color que hemos tomado en el Observatorio Angloaustraliano. Nuestro método es el fruto actual de un proceso concebido por Maxwell hace más de un siglo.

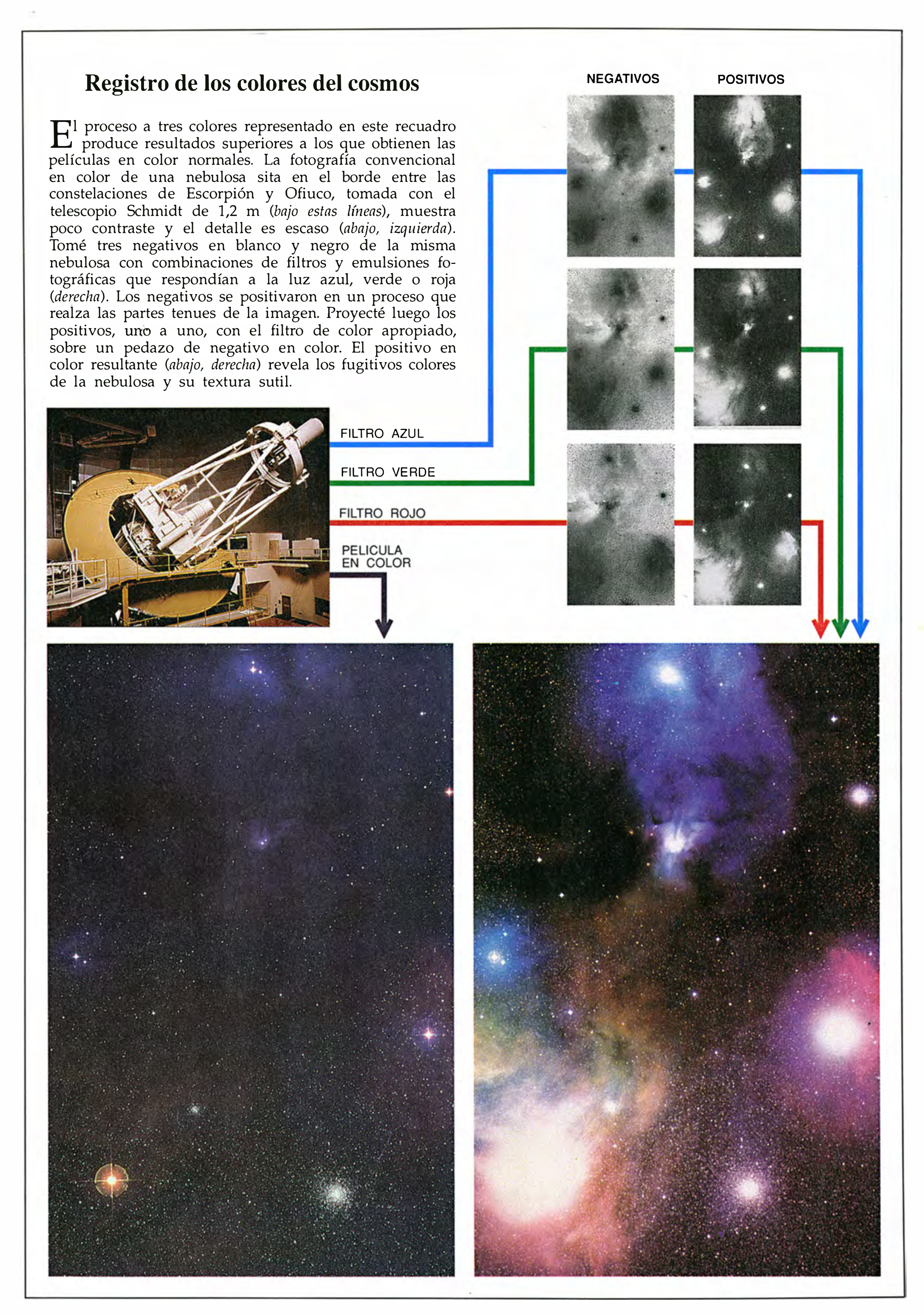
Una de las ventajas de la fotografía sobre la repre-



1. UN GLOBULO COMETARIO es una nube de gas frío y polvo cuya cola consiste en material barrido por la radiación proveniente de estrellas calientes cercanas. Los colores de esta notable fotografía hablan de forma elocuente sobre la naturaleza física del glóbulo, CG4. La cola muestra el tono azul típico de la luz reflejada por finas partículas de polvo. Un sorprendente brillo rojo, que rodea la cabeza del glóbulo, denota seguramente la emisión característica de los átomos de hidrógeno, liberados de CG4 por la luz estelar de alta energía. La fracción azul de la nebulosa adopta un matiz verdoso en aquellos puntos en los que la vemos a través del polvo situado en primer plano. La imagen contiene algunos de los detalles más débiles que se hayan plasmado jamás en una fotografía en color.

Registro de los colores del cosmos

El proceso a tres colores representado en este recuadro produce resultados superiores a los que obtienen las películas en color normales. La fotografía convencional en color de una nebulosa sita en el borde entre las constelaciones de Escorpión y Ofiuco, tomada con el telescopio Schmidt de 1,2 m (*bajo estas líneas*), muestra poco contraste y el detalle es escaso (*abajo, izquierda*). Tomé tres negativos en blanco y negro de la misma nebulosa con combinaciones de filtros y emulsiones fotográficas que respondían a la luz azul, verde o roja (*derecha*). Los negativos se positivaron en un proceso que realza las partes tenues de la imagen. Proyecté luego los positivos, uno a uno, con el filtro de color apropiado, sobre un pedazo de negativo en color. El positivo en color resultante (*abajo, derecha*) revela los fugitivos colores de la nebulosa y su textura sutil.



sentación electrónica descansa en las placas: logran apresar, con alta resolución, imágenes muy sensibles que cubren un área cuya extensión es casi ilimitada, tanta, por ejemplo, como el ancho completo del campo de visión del telescopio Schmidt del Reino Unido, en Australia. En comparación, los mayores DCA sólo miden unos cuantos centímetros de diámetro. La fotografía es, pues, un útil muy superior por lo que se refiere al registro de objetos astronómicos extensos (nebulosas y galaxias cercanas).

Además, la placa fotográfica proporciona un soporte compacto donde almacenar abundante información visual. Una sola placa del telescopio Schmidt, que capta una zona cuadrada de cielo de 6,4 grados de lado, contiene en sus 35,6 por 35,6 cm de superficie el equivalente a varios cientos de megabytes de datos.

La medición de los colores de las nebulosas, estrellas y galaxias es fundamental para comprender su composición y estado físico. Sin embargo, se ha tardado en apreciar el valor de los colores intrínsecos. Muchos opinan que el color es un concepto abstracto, de fácil cuantificación, pero que la película rara vez recoge de forma fehaciente.

Las limitaciones de las clásicas películas en color socavaron el interés de los astrónomos por la fotografía en color. Las películas modernas incorporan tres capas fotográficas,







2. LOS GLOBULOS DE BOK (*arriba*) son nubes interestelares oscuras y dispersas por todo este complejo nebular de la constelación de Centauro; presentan este aspecto oscuro debido a que están sobre un fondo muy brillante. La nube de Escorpión (*centro*) muestra lo que le ocurre a una nebulosa oscura una vez empiezan a formarse estrellas azules calientes en su vecindad. La radiación de un cúmulo de estrellas de ese tipo —que se encuentra inmediatamente más allá del borde inferior izquierdo de la fotografía— está destruyendo la nube. Los rayos de luz que emanan de las estrellas han producido una zona de hidrógeno luminiscente de color rojo en el borde de la nube. Aloja ésta estrellas brillantes que resultan visibles gracias al reflejo de su luz azul. La nebulosa acabará por dispersarse, dejando un grupo suelto de estrellas jóvenes del estilo del cúmulo abierto NGC 3293 (*abajo*). Una de las estrellas de esta nebulosa ha evolucionado hasta convertirse en una enorme gigante roja; pero sólo son rojas en la nomenclatura astronómica: esta imagen, en la que el equilibrio entre los colores se fijó como si se tratase de una película en color para luz diurna, demuestra que si el ojo humano fuera sensible a la luz débil, veríamos las gigantes rojas de color amarillo.

DAVID F. MALIN estudió química y durante años utilizó microscopios y rayos X para resolver problemas propios de esa ciencia. Pero en 1975 ingresó en el Observatorio Angloaustraliano en Epping, del que es su fotógrafo científico. Ha cosechado numerosas distinciones.

3. LOS ANILLOS LUMINOSOS (*arriba*) son "ecos" de la supernova 1987 A, explosión estelar ocurrida en una de las galaxias satélites de la Vía Láctea. El breve destello de luz proveniente de la supernova atravesó dos capas de polvo a medida que se fue propagando. Los anillos representan la luz reflejada por las partículas de polvo, y su tono de color, el de la supernova en el instante de su máximo brillo. La fotografía se realizó substrayendo un conjunto de imágenes a tres colores, tomadas antes de que apareciera la supernova, de otro conjunto fotografiado después de que se hubiera extinguido. La nebulosidad común a ambos grupos de placas no quedó completamente cancelada, de ahí el fondo moteado. La nebulosa del Cangrejo (*abajo*) consta de los restos, aún en expansión, de la supernova del año 1054. Se consiguió esta imagen mediante el reprocesamiento de placas fotográficas tomadas con el telescopio Hale de 5 metros en 1955 y 1956. Las regiones azules exhiben la radiación generada por partículas cargadas que se desplazan a gran velocidad a través de un campo magnético. La estructura filamentosa de color rojo está formada por la emisión, más corriente, de átomos de hidrógeno.



cada una con una capa de halogenuro de plata sensible al azul, al verde o al rojo. Cuando se procesa la película, estas capas crean tintes de color cian, magenta o amarillo. Estas películas, aunque prácticas, reproducen deficientemente los colores auténticos de los objetos celestes lejanos.

Las películas en color se ven además afectadas por la luminosidad atmosférica nocturna, débil y penetrante, generada en la alta atmósfera por la recombinación de iones y electrones que durante el día separa la luz solar. Causa un velado gradual de las placas fotográficas que limita su sensibilidad. Además, algunas nebulosas sólo emiten luz en ciertos colores, o longitudes de onda, discretos que las películas en color no pueden registrar bien. Súmese a ello que estas películas no responden de forma fiable a los procesos de hipersensibilización del soporte fotográfico de los que se valen los astrónomos.

Para evitar estos problemas, hemos recurrido a la venerable técnica de creación de imágenes en color de Maxwell. Mientras investigaba en la naturaleza de la visión, demostró que se podía reproducir el color de una escena de la siguiente manera: la fotografiaba sucesivamente en rojo, verde y azul; con los negativos hacía tres diapositivas en blanco y negro, que proyectaba sobre una pantalla de color blanco a través de filtros de color rojo, verde o azul. En 1861, en la Institución Real de Londres, ante un público estupefacto, mostró, mediante la superposición de las imágenes proyectadas, la primera fotografía en color realizada en el mundo.

En la versión modernizada del proceso de Maxwell se construye la fotografía en color a partir de tres placas en blanco y negro. Al crear así la imagen, se evitan muchas de las limitaciones de que adolece la película en color, y se permite, en la fase en la que los negativos en blanco y negro, tomados con el telescopio, se transforman en positivos, aplicar poderosas técnicas de cuarto oscuro.

De entre éstas destaca la "máscara difusa", que se vale de un positivo fotográfico borroso para modular el amplio rango de contrastes que poseen algunos negativos astronómicos, sin merma de la riqueza de detalle. Otro proceso, llamado de amplificación fotográfica, realza de

forma selectiva las capas superiores de la emulsión fotográfica, que suelen contener las partes más tenues de la imagen. Se pueden apilar negativos o, incluso, retirar imágenes —mediante la iluminación de su negativo a través de un positivo del mismo objeto— con el fin de que resalten las sutiles variaciones que existen entre las diferentes exposiciones de una misma porción de cielo.

Disponemos luego los positivos fotográficos en una ampliadora y los proyectamos con el oportuno filtro rojo, verde o azul. Al contrario que Maxwell, proyectamos las imágenes sobre una pedazo grande de negativo de película clásica en color, que se convierte en el negativo original a partir del que se realizan las fotografías en color definitivas.

Este proceso aditivo nos permite controlar el equilibrio cromático de manera que los objetos aparezcan al ojo humano tal y como lo harían si éste mantuviese su sensibilidad cromática a niveles bajos de luz. Muchos de los objetos que hemos escogido no se habían visto antes en color. Su aspecto nos ha sorprendido gratamente.



4. LAS GALAXIAS EN COLISION que reciben el nombre de "Antenas" (*derecha*) muestran dos chorros curvos de estrellas, proyectados hacia fuera por la gravitación mutua de las galaxias. Las regiones azules marcan los lugares donde se encuentran los cúmulos de estrellas jóvenes calientes originados por el choque de las galaxias. Los colores, más intensos y brillantes, de la galaxia superior dan a entender que contenía más gas que su compañera en el momento de la colisión. Hay oscuras nubes de polvo y nebulosas con emisión de hidrógeno, de color rosa, esparcidas por la región que separa las dos galaxias. La nebulosa Trífida (*abajo*) es un ejemplo, a menor escala, de una nebulosa así en nuestra propia galaxia. Un cúmulo de estrellas jóvenes reside en el punto donde se cortan las tres bandas oscuras de partículas de polvo. La radiación ultravioleta que emana de las más calientes de estas estrellas excita los átomos de hidrógeno que se encuentran en las cercanías y les hace emitir una luz roja. Una pequeña cantidad de luz azul penetra más allá de la región roja y se dispersa en las partículas de polvo que rodean a la nebulosa. La nebulosa de reflexión independiente a la derecha de la Trífida jamás había sido captada con tanta riqueza de detalle en una fotografía en color.

Dominar el caos

Podemos controlar ciertos sistemas de comportamiento caótico. En ingeniería se empieza ya a utilizar el caos para estabilizar láseres, circuitos electrónicos e incluso corazones de animales

William L. Ditto y Louis M. Pecora

¿De qué sirve el caos? No faltará quien diga que el caos es por definición inestable e incontrolable y, por tanto, inutilizable. Es imposible, en efecto, predecir exactamente cuál será el comportamiento de un sistema caótico durante períodos largos. Por esa razón, los ingenieros han venido haciendo con el caos una sola cosa: sencillamente, evitarlo. Nos parece que tal proceder es un tanto corto de miras. En el plazo de estos últimos años nosotros y nuestros colegas hemos demostrado que el caos es manejable, que cabe sacarle provecho, que, incluso, es de valor incalculable.

El caos se ha aplicado ya para aumentar la potencia de los láseres, para sincronizar la salida de circuitos electrónicos, para controlar las oscilaciones de reacciones químicas, para estabilizar el errático latir del corazón de animales enfermos y para codificar mensajes electrónicos y garantizar el secreto de las comunicaciones. Estamos convencidos de que en un futuro cercano los ingenieros ya no rehuirán el caos, sino que lo adoptarán.

Dos son, cuando menos, las razones de que el caos sea tan útil. En primer lugar, la conducta de un sistema caótico es la agregación de muchas conductas ordenadas, ninguna de las cuales prevalece en circunstancias ordinarias. Los investigadores han demostrado en estos últimos años que, al perturbar adecuadamente un sistema caótico, cabe estimularlo para que siga uno de los muchos comportamientos regulares de que consta. Los sistemas caóticos son de una flexibilidad poco corriente, porque pueden conmutar rápidamente entre numerosos comportamientos distintos.

En segundo lugar, aunque el caos es impredecible, es determinista. Si dos sistemas caóticos casi idénticos son impelidos o excitados por la misma señal, la señal de salida que produzcan será idéntica, aunque nadie pueda asegurar de antemano en qué consistirá. [Véase *Taller y laboratorio*, en este mismo número.] Este fenómeno ha posibilitado ya una variedad de tecnologías de interés para las comunicaciones.

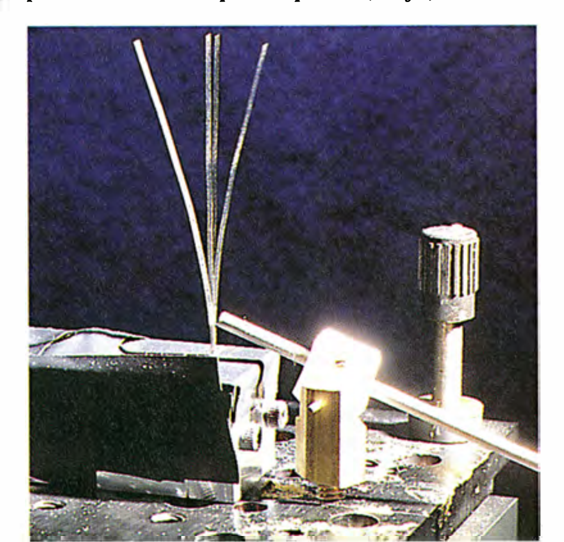
Durante más de un siglo, el estudio del caos ha sido competencia casi exclusiva de un puñado de teóricos, a los cuales debe atribuirse el mérito de haber desarrollado algunos de los conceptos en que se fundamentan las aplicaciones. La mayoría de los sistemas naturales son no lineales; el cambio de su respuesta no es función sencilla de los cambios en los datos o condiciones. El caos es uno de los tipos de comportamiento no lineal. El rasgo distintivo de los sistemas caóticos es que exhiben gran sensibilidad a las condiciones iniciales. En particular, si dos sistemas caóticos casi idénticos se encuentran en estados ligeramente distintos, evolucionarán pronto hacia estados muy discrepantes.

Al observador superficial le parecerá que los sistemas caóticos se comportan de forma aleatoria. Mas un examen atento revela que poseen un orden subyacente. Con el fin de representar la dinámica de cualquier sistema, el físico-matemático irlandés William Hamilton, el matemático Karl Jacobi, alemán, y otros contemporáneos suyos idearon hace más de 150 años uno de los conceptos fundamentales necesarios para la comprensión de la dinámica no lineal. Esa noción fundamental es la de espacio de estados.

En todo sistema dinámico que admita descripción mediante ecuaciones matemáticas intervienen dos clases de variables: variables dinámicas y variables estáticas. Las variables dinámicas son las magnitudes esenciales que están cambiando sin cesar. En el caso de un mecanismo caótico, las variables dinámicas podrían ser la posición de una pieza móvil y su velocidad. Las variables estáticas, a las que también podríamos llamar parámetros, se ajus-

WILLIAM L. DITTO y LOUIS M. PECORA han abierto el camino para el estudio del control del comportamiento caótico de sistemas mecánicos, eléctricos y biológicos. Ditto enseña física en el Instituto de Tecnología de Georgia. A él y a sus colaboradores se les debe el primer ensayo experimental de dominio del caos. Pecora trabaja, desde 1977, en el Laboratorio de Investigaciones Navales de los EE.UU.

1. ESTA TIRA METALICA se cimbrea caóticamente en un campo magnético cuya intensidad fluctúa de forma periódica. Progresos recientes han permitido controlar movimientos caóticos como éstos. El material de la tira modifica su rigidez según la intensidad del campo magnético. El campo magnético varía periódicamente, a razón de un ciclo por segundo. Una lámpara estroboscópica lanza sus destellos con la misma frecuencia, con lo que la fotografía, tomada con larga exposición, capta las irregularidades del movimiento de la tira. Un sistema computarizado analiza el movimiento de ésta según un esquema desarrollado por teóricos de la Universidad de Maryland. El ordenador introduce ligeras modificaciones en el campo con las que transforma los movimientos caóticos (*arriba*) en oscilaciones periódicas cuya frecuencia puede ser casi la que se quiera (*abajo*).



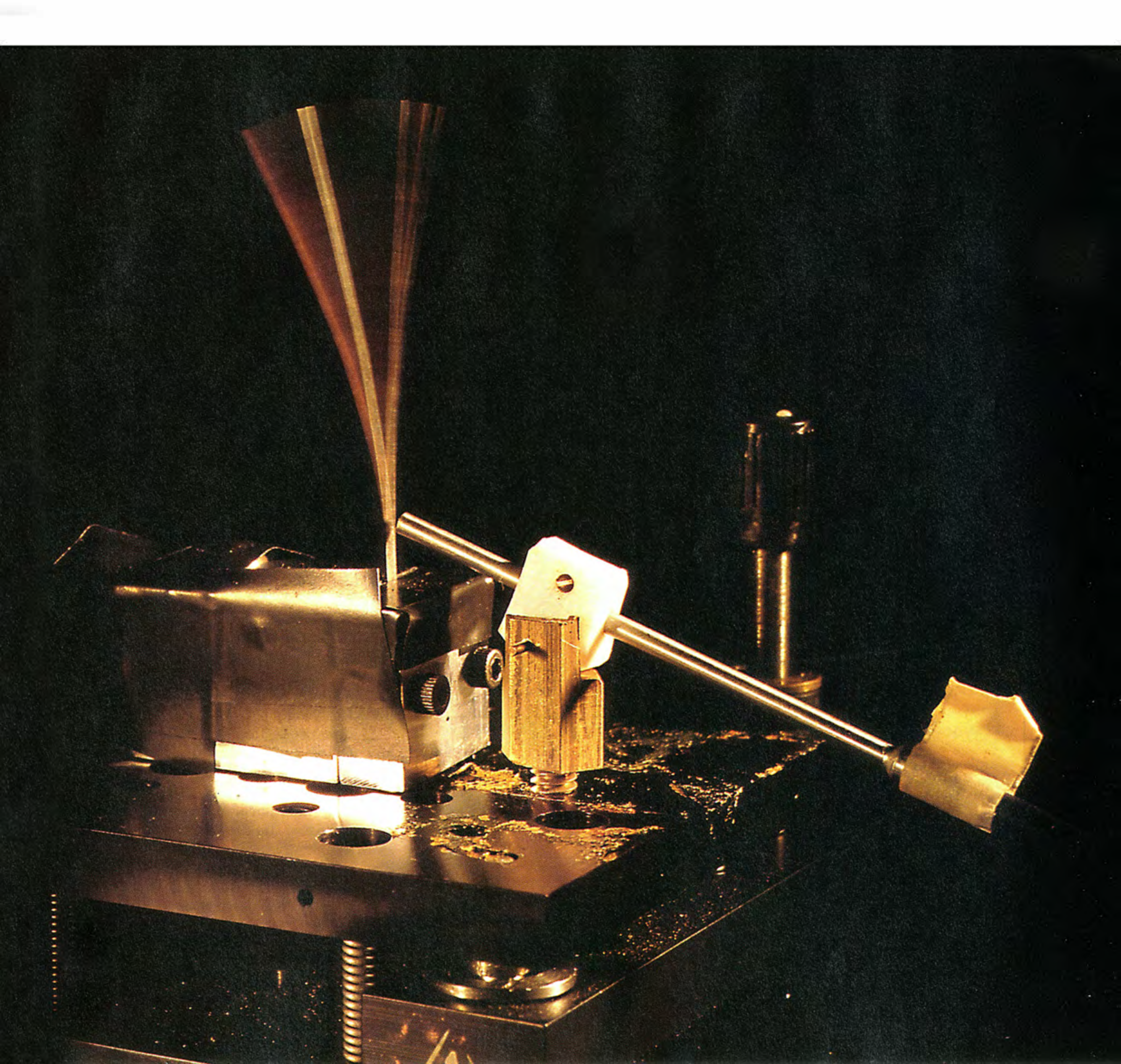
tan a cierto punto o valor; a partir de ese momento ya no varían. Una variable estática de un mecanismo caótico podría ser la longitud de alguna de sus piezas, o la velocidad de un motor.

El espacio de estados consiste esencialmente en un gráfico cartesiano, en el cual cada eje está asociado con una variable dinámica. Cada punto del espacio de estados representa el estado del sistema en un momento dado. Al ir evolucionando el sistema, va pasando en el espacio de estados de unos puntos a otros, describiendo al hacerlo una línea a la que se da el nombre de trayectoria, que es representación de la historia del sistema dinámico.

Las trayectorias de los sistemas caóticos en el espacio de estados son complicadas. En contraposición, los sistemas lineales describen trayectorias simples, bucles, por ejemplo. Pero la trayectoria de un sistema caótico no es aleatoria; pasa por ciertas regiones del espacio, al tiempo que elude el paso por otras. La trayectoria se ve arrastrada hacia una región conocida por "atractor caótico"; éste es es la manifestación de los parámetros fijos y de las ecuaciones que determinan los valores de las variables dinámicas.

Por tanto, si medimos la trayectoria de un sistema caótico, no será posible predecir en qué lugar del atractor se encontrará en el futuro lejano. El atractor caótico, por otra parte, es siempre el mismo, no importa cuándo lo midamos. En cuanto los investigadores disponen de información acerca del atractor caótico de un sistema, pueden empezar a servirse del caos.

Uno de los autores (Pecora) descubrió en 1989 que era posible construir un sistema caótico de modo tal que todas sus partes funcionasen en perfecta sincronía. Como es bien sabido, los sistemas caóticos aislados no pueden sincronizarse. Si pudiéramos construir dos sistemas caóticos virtualmente idénticos, pero que estuvieran separados, pronto "dejarían de ir al compás", porque la más leve



diferencia entre los sistemas, por pequeña que fuese, se amplificaría enseguida. Sin embargo, es posible disponer las partes de un sistema de manera que exhiban idéntico comportamiento caótico. Más todavía, la distancia física que medie entre las ubicaciones de estas partes puede ser muy grande, lo que permite que el caos sincronizado sea de utilidad para las comunicaciones.

La construcción de un sistema caótico cuyas partes sean sincrónicas exige que se comprenda el concepto de estabilidad. Un sistema es estable si ante una ligera perturbación su trayectoria por el espacio de estados cambia sólo un poco con respecto a la que hubiera descrito de no haberla sufrido. A. M. Lyapunov, matemático ruso, cayó en la cuenta de que bastaba un solo número para representar el cambio provocado por una perturbación. Dividía el tamaño de la perturbación en un instante dado por el tamaño que tenía un instante después. Realizaba seguidamente el mismo cómputo en diversos intervalos y promediaba los resultados.

El número resultante, hoy denominado multiplicador de Lyapunov, describe cuánta modificación, por término medio, generará la perturbación inicial. Si el multiplicador de Lyapunov es menor que la unidad, las perturbaciones se amortiguarán y tenderán a extinguirse: el sistema es estable. Sin embargo, cuando el multiplicador es mayor que la unidad, las discrepancias tienden a aumentar y el sistema se torna inestable. Todos los sistemas caóticos tienen un multiplicador de Lyapunov mayor que uno, y por lo tanto son siempre inestables. Esta es la raíz de la impredecibilidad del caos.

Para que puedan sincronizarse, las partes de un sistema caótico han de ser estables. No se quiere decir con esto que el sistema entero no pueda ser caótico. Si dos partes estables y semejantes se excitan con una misma señal caótica, ambas parecerán exhibir comportamiento caótico, pero tenderán a suprimir y no a amplificar las posibles diferencias que haya entre ellas, creándose así la oportunidad de un caos sincronizado.

Un diseño preparado por Pecora y por Thomas L. Carroll, del Laboratorio de Investigaciones Navales de los EE.UU., utiliza como mecanismo sincronizador un subsistema de un sistema caótico ordinario. Empezaron por distinguir, de otras partes auxiliares, el subsistema sincronizador; duplicaron después los componentes que lo constituyen. El subsistema auxiliar proporcionaba entonces una señal excitadora para el subsistema sincronizador original y para su duplicado.

Si los multiplicadores de Lyapunov de los subsistemas sincronizadores son menores que la unidad, es decir, si son estables, se comportarán caóticamente pero se encontrarán sincronizados. La estabilidad de los subsistemas garantiza que las posibles perturbaciones serán amortiguadas hasta la extinción y que, por consiguiente, los subsistemas de sincronismo reaccionarán de forma prácticamente idéntica a las señales

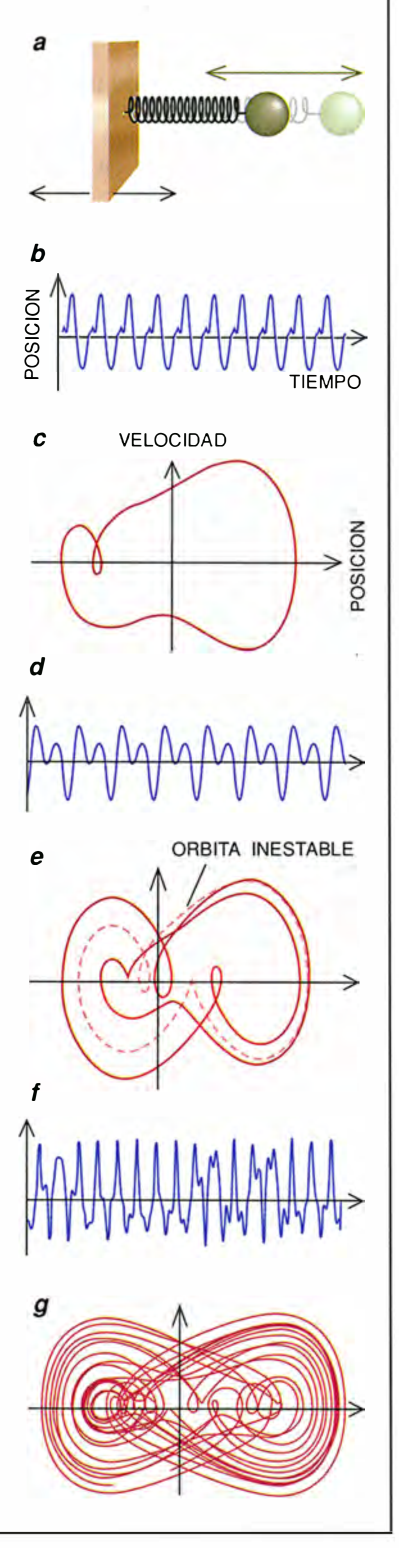
Representación del caos

Se suele representar el movimiento de un objeto mediante una "serie temporal", es decir, un gráfico que muestra el cambio de posición con el tiempo. Sin embargo, para representar los movimientos caóticos resulta preferible un "espacio de estados", que ilustra la evolución de las variables que van cambiando, por lo normal la posición y la velocidad del objeto. Fijémonos, por ejemplo, en el movimiento de la bola en el mecanismo de la derecha (*a*). La bola está ligada a un muelle cuya rigidez aumenta al ser alargado o comprimido (es decir, el muelle ejerce una fuerza de reposición no lineal). Al moverse cíclicamente el tablero hacia atrás y hacia adelante, empuja o tira del muelle, obligando a la bola a moverse. En definitiva, el movimiento de la bola depende de la fuerza que se ejerza sobre el muelle.

Si la fuerza es débil, la bola describe una trayectoria sencilla, que se repite con cada ciclo de la fuerza ejercida por el tablero (*b*). La trayectoria en el espacio de estados (*c*) muestra en cada instante toda la información concerniente a la bola. Como el movimiento es periódico, la trayectoria pasa y pasa sobre sí misma a cada ciclo del tablero. El espacio de estados exhibe un "atractor de período 1". Observaríamos lo mismo si la bola estuviera ligada a un muelle ordinario (o lineal).

El comportamiento interesante empieza cuando aumenta la fuerza sobre el muelle. Al llegar a cierto punto, en cada oscilación del tablero la bola se mueve hacia adelante y hacia atrás de forma más complicada. Se modifican, pues, la serie temporal y la trayectoria en el espacio de estados (*d*, *e*). La anterior órbita de período uno se vuelve inestable y el sistema produce un atractor de período dos; esto es, para que la trayectoria pase sobre sí misma son entonces necesarios dos ciclos del tablero.

Cuando la fuerza rebasa cierto valor umbral, la bola se mueve caóticamente. No se aprecia en la serie temporal ninguna regularidad (*f*) . Por otra parte, el espacio de estados revela la aparición de un atractor caótico (*g*): la trayectoria en el espacio de estados nunca se cierra sobre sí misma, si bien ocupa sólo ciertas regiones del espacio de estados. En realidad, un atractor caótico es una combinación de órbitas periódicas inestables.



del subsistema auxiliar, por complejas que sean.

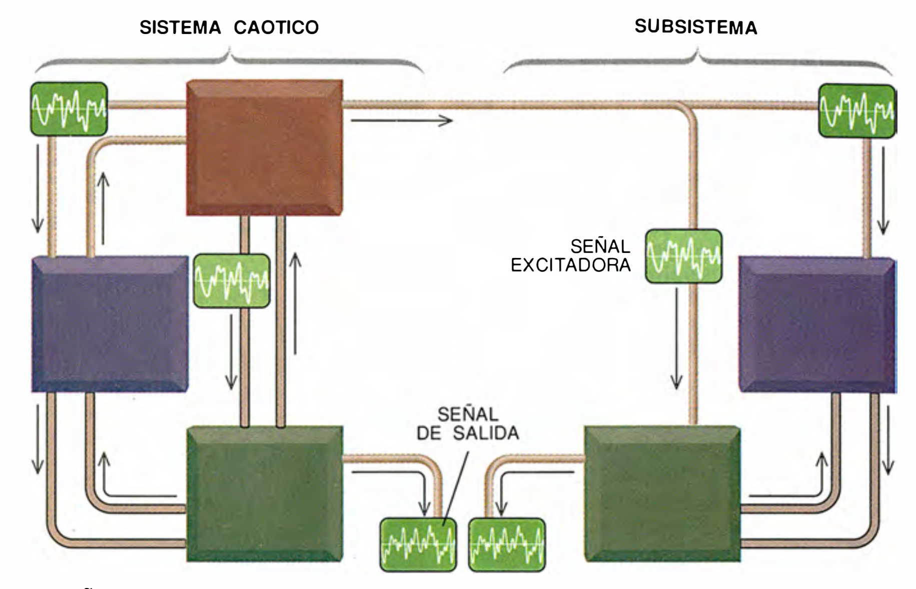
Como primer paso para demostrar la posibilidad de caos sincronizado, Pecora creó una simulación computarizada basada en el sistema caótico de Lorenz, que toma su nombre del meteorólogo estadounidense Edward N. Lorenz, quien en 1963 descubrió un tipo de comportamiento caótico al estudiar por computadora el clima. El sistema de Lorenz tiene tres variables dinámicas, por cuya razón la imagen del espacio de estados de tales sistemas es tridimensional. Al trazar gráficamente la trayectoria del sistema de Lorenz en el espacio de estados surge una figura denominada "atractor caótico de Lorenz".

Para efectuar la simulación por ordenador, Pecora empezó con las tres variables dinámicas del sistema de Lorenz y seleccionó una de ellas como señal excitadora. Duplicó seguidamente el subsistema constituido por las otras dos variables dinámicas. Aunque en un principio se había ajustado el subsistema y su duplicado para producir salidas diferentes, convergieron rápidamente, generando señales caóticas en sincronía. Los dos sistemas dinámicos partieron de distintos puntos del espacio de estados, acomodaron pronto su paso el uno al otro y danzaron por sus atractores caóticos con la sincronía de un *pas de deux*.

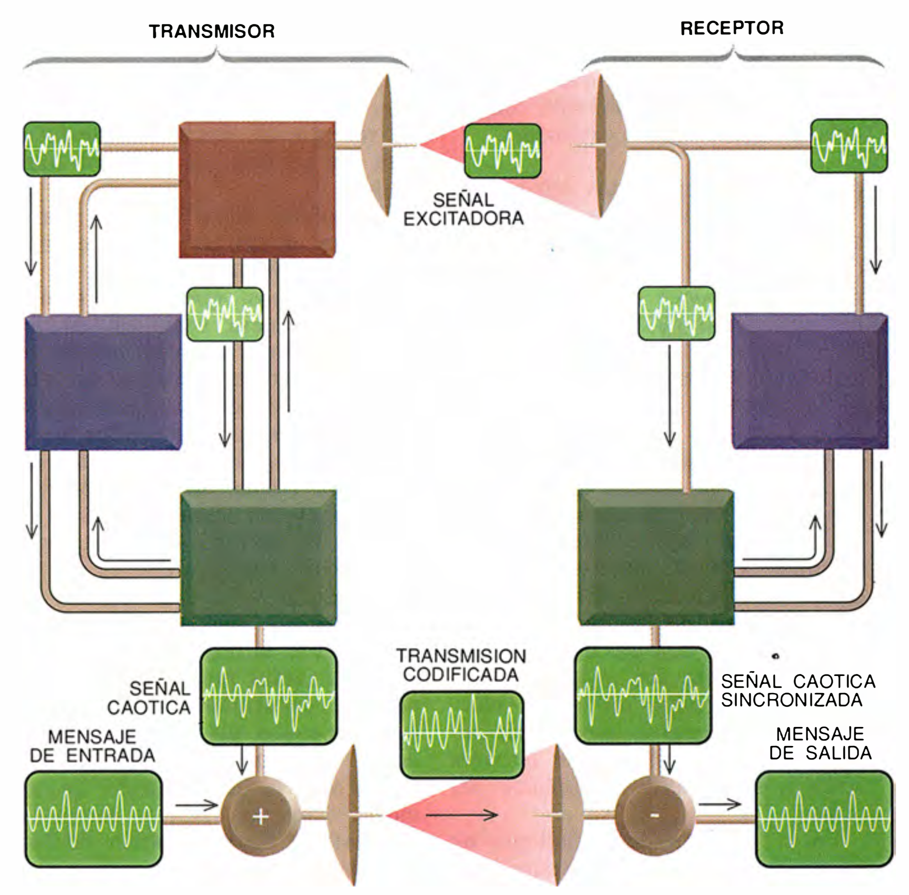
Hasta este descubrimiento, los científicos no tenían razones para creer que la estabilidad de un subsistema pudiera ser independiente de la estabilidad del resto del sistema. Tampoco se le había ocurrido a nadie que un sistema no lineal pudiera devenir estable al ser excitado por una señal caótica.

La estabilidad no sólo depende de las propiedades del subsistema, sino también de la señal excitadora. Un subsistema puede ser estable si es excitado por cierto tipo de señales caóticas y no serlo ante señales de otro tipo. La clave consiste en hallar subsistemas que reaccionen de forma estable a señales caóticas. En ciertos casos, la estabilidad de un subsistema puede ser estimada merced a un modelo matemático, pero tales predicciones son, en general, difíciles.

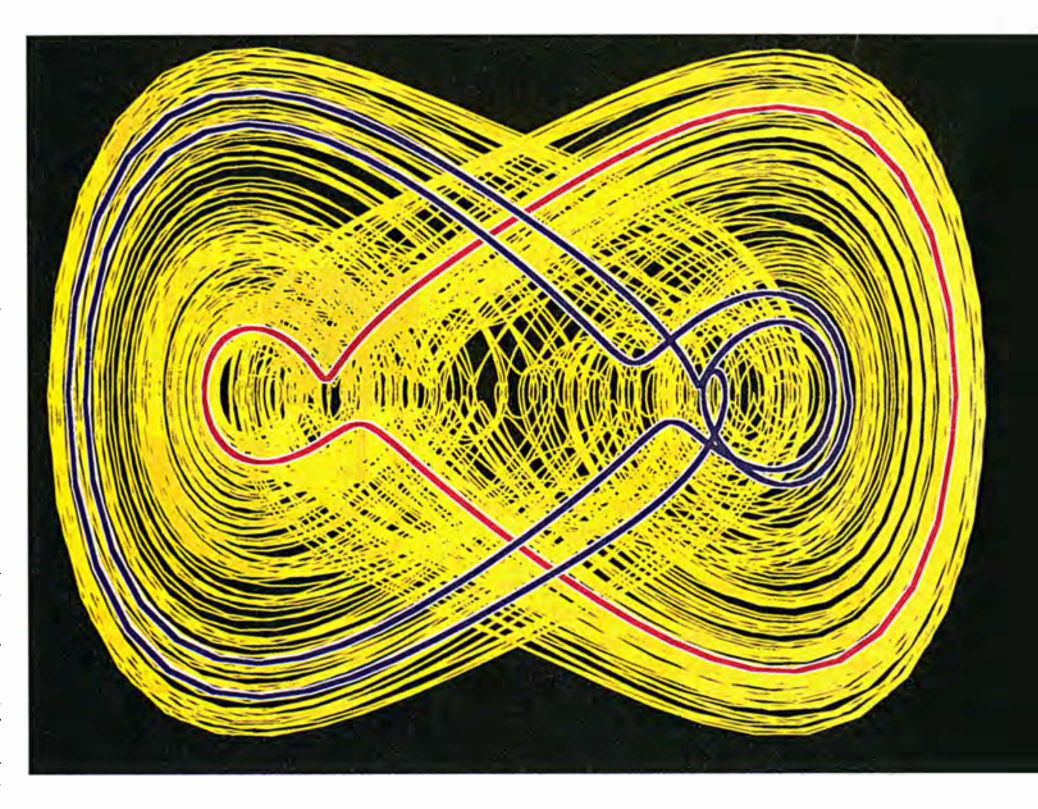
Los investigadores apenas si han empezado a experimentar con el caos sincronizado. Carroll construyó en 1989 el primer circuito de caos sincronizado. Duplicando parte de un circuito que exhibía comportamiento caótico, consiguió crear un circuito en el cual el subsistema y su duplicado eran excitados por la misma



2. SEÑALES CAOTICAS producidas por un sistema y un subsistema, generadas de manera que discurran con plena sincronía. La propiedad del sistema que cuenta es que los componentes azul y verde sean estables cuando se las excita mediante señales caóticas procedentes de la sección roja. En otras palabras, pequeñas variaciones de los ajustes iniciales de las partes azul y verde tienen escaso o nulo efecto sobre el comportamiento que acabarán adoptando. El subsistema consiste en duplicados de los componentes verde y azul del sistema. Aunque las partes roja, azul y verde del sistema se envían señales entre sí, no existe realimentación entre el componente rojo y el subsistema.



3. EL SECRETO de las comunicaciones se puede conseguir mediante el esquema de caos sincronizado que se representa en la ilustración de arriba. El transmisor suma a la señal del mensaje una señal caótica; a continuación, radia la señal codificada y una señal excitadora. En el receptor, la señal excitadora es llevada a dos componentes, que de esa forma generan una señal caótica en sincronía con la señal producida por el transmisor. Se le resta entonces la señal caótica a la señal codificada y se recupera la información original.



4. UN ATRACTOR CAOTICO consta de múltiples órbitas periódicas —por ejemplo, la órbita de período uno (*en rojo*) y la órbita de período 2 (*en azul*). Este atractor representa un sistema cuya velocidad y posición cambian a lo largo de una sola dirección. Un eje representa la posición; el otro, la velocidad. Los atractores pueden ser multidimensionales, pues los sistemas pueden tener muchas variables, que equivalen a otras tantas dimensiones en el espacio de estados: por ejemplo, posiciones y velocidades que varíen en tres dimensiones.

señal caótica. Estos dos subsistemas generaban tensiones eléctricas que fluctuaban de manera caótica, aunque estaban siempre en fase.

Carroll se dio cuenta de que su circuito de caos sincronizado podría servir para crear un sistema de comunicaciones secretas. Supongamos, por ejemplo, que Benito desea enviar un mensaje confidencial a Alicia. Benito posee un dispositivo que genera una señal excitadora caótica, así como un subsistema que reacciona establemente a esa señal. Alicia tiene una copia del subsistema. Benito traduce su mensaje secreto, convirtiéndolo en una señal electrónica, y lo combina con la salida caótica de su subsistema. Benito transmite entonces el mensaje codificado conjuntamente con la señal excitadora.

Quien intercepte estas señales detectará sólo ruido caótico y será incapaz de extraer información (a menos, claro está, que se las arregle para disponer de una copia de los subsistemas de Alicia o de Benito). Cuando Alicia recibe la señal excitadora la hace pasar por su propio subsistema, que reproduce la salida caótica del subsistema de Benito. Alicia puede entonces restar de la salida de su sistema esta salida y recuperar el mensaje secreto.

Es bastante fácil, y así lo ha demostrado Carroll, recuperar señales enterradas en caos. Sin embargo, para construir un sistema de comunicaciones que sea práctico y seguro es probable que los ingenieros tengan que desarrollar refinados esquemas en los cuales el proceso de codificación entrañe más que la mera adición de caos a las señales del mensaje.

En el Instituto de Tecnología de Massachusetts, en la Universidad estatal de Washington y en la de California en Berkeley hay grupos de investigación que están construyendo nuevas combinaciones de subsistemas caóticos destinadas al procesamiento de señales y a las comunicaciones. También nosotros hemos proseguido nuestro trabajo; hemos hallado un sistema caótico que realiza las mismas operaciones que un bucle enlazado por fase, dispositivo que, entre otras cosas, permite que un receptor de frecuencia modulada siga los cambios de la señal transmitida.

Tan grande fue el éxito de Carroll y Pecora al utilizar señales caóticas para gobernar partes estables de sistemas caóticos, que ahora piensan que quizá fuese ventajoso emplear señales caóticas a fin de excitar sistemas periódicos estables. Su intuición les ha conducido hasta otra serie de prometedoras aplicaciones. Imaginemos dos sistemas a los que excita la misma señal periódica y que tienen un mismo atractor no caótico, de período 2. La expresión "período 2" significa que en dos períodos de la señal excitadora el sistema describe una vuelta alrededor del atractor. Si dos de tales sistemas están excitados por la misma señal, pero se encuentran inicialmente en lados opuestos del atractor, se pondrán a dar vueltas en torno a éste, sin alcanzarse jamás. Dicho de otro modo, si los dos sistemas parten con un desfase, se mantendrán desfasados para siempre.

Se ha descubierto que sustituyendo la señal excitadora periódica por cierto tipo de señal caótica, es posible forzar a los dos sistemas a operar en fase. Sin embargo, no todos los tipos de señal caótica permiten conseguir este resultado. Algunas de tales señales pueden hacer que los propios sistemas se comporten caóticamente, eliminando así toda posibilidad de que entren en fase. Los ingenieros han de averiguar, pues, qué tipo de señal caótica es idónea para cada tipo de sistema.

Como elección inicial puede resultar adecuada la señal que produce un sistema inventado por Otto Rössler. La señal de Rössler es casi periódica y recuerda a una señal sinusoidal cuya amplitud y longitud de onda hubiesen sido aleatorizadas un poco al pasar de un ciclo al siguiente. Las señales de este tipo han recibido el nombre de señales cuasiperiódicas, y en general es posible construirlas tomando una señal periódica y aportándole caos. Si una señal cuasiperiódica apropiada excita a varios sistemas idénticos cuyos atractores sean de período dos o mayor, hará que vuelvan a entrar en fase.

El primero en poner en práctica este método fue Carroll, en 1990. Construyó un conjunto de circuitos electrónicos cuyos atractores tenían período dos, y los excitó con una de varias señales pseudoperiódicas, incluidas las de tipo Rössler. Descubrió que en todos los casos podía resolver el problema del desfase. Sin embargo, los circuitos mostraban desfases durante períodos breves. Ello se debía a que es imposible construir varios circuitos que sean exactamente iguales. No obstante, resulta perfectamente factible



5. UNA SECCION DE POINCARE viene a ser, más o menos, una rebanada perpendicular extraída del atractor caótico, que en este ejemplo es una versión tridimensional del atractor que vemos en la página contigua. Los puntos de la sección de Poincaré representan distintas órbitas periódicas inestables. La órbita de período uno se reduce a un solo punto (*en rojo*), y la órbita de período 2 se corresponde con dos puntos (*en azul*). La determinación de la sección de Poincaré constituye un paso clave para controlar el caos.

mantener los circuitos en fase durante el 90 por ciento del tiempo.

Mientras que algunos investigadores han tratado de hallar utilidad al caos, otros han querido someterlo a control. Uno de los fundamentos de esta empresa es el conocimiento de que un atractor caótico es una colección infinita de comportamientos periódicos inestables. La forma más sencilla de ilustrar esta tesis es examinar un sistema compuesto por un peso, un muelle "no lineal" y un motor. Un extremo del muelle pende del motor, el otro está sujeto al peso. El motor hace subir y bajar el muelle con una fuerza que puede ajustarse a voluntad. Las variables dinámicas del sistema son la posición del peso y su velocidad, que definen el espacio de estados. Si la fuerza accionadora del motor es débil, el peso subirá y bajará una sola vez por cada ciclo del motor. Al mismo tiempo, el peso se acelera y decelera, y por consiguiente su trayectoria en el espacio de estados dibuja un bucle simple, lo que se conoce técnicamente como una órbita de período uno.

Al aumentar un poco la fuerza del motor, la órbita de período uno se torna en comportamiento inestable, moviéndose el peso arriba y abajo dos veces por cada ciclo del motor. En el espacio de estados la trayectoria es ahora un bucle doble, una órbita de período dos. Al aumentar de nuevo la fuerza excitatriz, la órbita de período dos se tornará inestable, y emergerá una órbita de período cuatro. Si la fuerza excitadora es intensa, todas las órbitas periódicas serán inestables, y surgirá un atractor caótico. En un sentido riguroso, el atractor caótico es un combinado de órbitas periódicas e inestables.

Hace cuatro años, Edward Ott, Celso Grebogi y James A. Yorke, de la Universidad de Maryland, desarrollaron un esquema en el que un sistema caótico puede ser inducido a seguir una órbita inestable particular a través del espacio de estados. El esquema puede, pues, sacar partido de la vasta cantidad de comportamientos posibles que componen el sistema caótico.

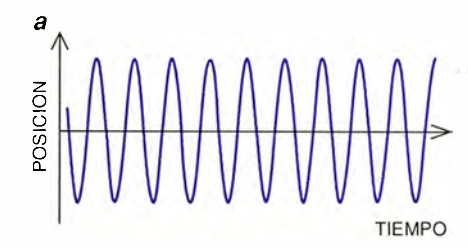
El método ideado por Ott, Grebogi y Yorke (OGY) es conceptualmente sencillo. Para empezar, se obtiene información acerca del sistema caótico analizando una sección transversal del atractor caótico. Una vez recogida la información concerniente a esta sección (llamada sección de Poincaré) se deja que el sistema funcione y se espera a que se acerque a una de las órbitas periódicas deseadas de la sección. Se induce, luego, al sistema a permanecer en dicha órbita perturbando el parámetro apropiado. Uno de los puntos fuertes de este método es que no requiere un modelo detallado del sistema caótico, sino tan sólo cierta información relativa a la sección de Poincaré. Esta es la razón de que el método OGY haya tenido tanto éxito en el control de una variada gama de sistemas caóticos.

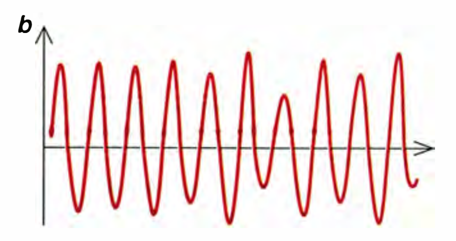
Las dificultades prácticas del método OGY estriban en conseguir la sección de Poincaré y en calcular después las perturbaciones de control. Una de las formas más sencillas de obtener una sección de Poincaré consiste en medir a intervalos regulares la posición de la trayectoria del sistema en el espacio de estados. Las medidas se pueden efectuar al término de cada ciclo de la señal excitadora. Esta técnica genera un mapa donde una órbita de período uno se traduce en un punto, una órbita de período dos se presenta como un par de puntos, y así sucesivamente.

El cálculo de las perturbaciones de control requiere el análisis de la sección de Poincaré con el fin de determinar la forma en que se aproxima el sistema a la órbita deseada, representada por un punto fijo. Este análisis consta de tres pasos. Primero, se determinan las direcciones a lo largo de las cuales converge el sistema hacia el punto fijo o diverge de él. En segundo lugar, hay que obtener la tasa de convergencia o divergencia, una cantidad relacionada con el multiplicador de Lyapunov. Es preciso, por último, averiguar cuánto se desvía la órbita en el espacio de fases cuando el parámetro de control se modifica en un sentido u otro. Este cálculo en tres etapas proporciona la información necesaria para determinar las perturbaciones que empujarán al sistema hacia la órbita periódica deseada.

Cuando se modifica el valor del parámetro de control, el atractor caótico queda un tanto desviado y distorsionado. Si todo marcha según lo previsto, el nuevo atractor induce al sistema a continuar en la trayectoria que se quiere que siga. Si el sistema empieza a desmandarse, se vuelve a modificar el parámetro de control, con lo que se genera de nuevo un atractor que posee las propiedades buscadas.

El proceso viene a ser como tratar





6. SE PUEDE LOGRAR en ocasiones que sistemas caóticos desfasados operen en fase si los excitamos mediante señales caóticas especiales. Por ejemplo, si un par de sistemas caóticos de período 2 son excitados con la misma señal periódica (*a*) y están inicialmente desfasados, permanecerán desfasados. Pero si estos mismos sistemas son excitados con una señal Rössler (*b*) , que es ligeramente caótica, es posible que se los obligue a funcionar en fase.

de mantener en equilibrio una bola sobre una silla de montar. Dejemos la bola en el centro de la silla: tenderá a rodar hacia uno de los lados, pero es muy inverosímil que caiga por delante o por detrás. Para evitar que la bola caiga es preciso mover muy rápidamente la silla hacia un lado u otro. De forma parecida, es preciso desplazar el atractor con el objeto de compensar la tendencia del sistema a escapar de la trayectoria deseada en una u otra dirección. Y exactamente lo mismo que la bolita reacciona a los pequeños movimientos de la silla, la trayectoria es muy sensible a cambios en el atractor.

Lo verdaderamente extraordinario del trabajo de Ott, Grebogi y Yorke es que puso de manifiesto que la presencia del caos puede constituir una ventaja en el control de los sistemas dinámicos. Dada la extrema sensiblidad de éstos a las condiciones iniciales, también reaccionan muy deprisa a los elementos de control que se introduzcan en ellos.

En 1990, uno de nosotros (Ditto), en colaboración con Mark L. Spano y Steven N. Rauseo, del Centro de Guerra Naval, se dispuso a verificar las ideas de Ott, Grebogi y Yorke. No esperábamos que todo fuera bien a la primera. Pocas son las teorías que sobreviven a la toma inicial de contacto con el experimento. Pero el trabajo de Ott, Grebogi y Yorke resultó ser la excepción. En un par de meses conseguimos controlar el caos en un sistema experimental bastante simple.

En el experimento se utiliza una tira metálica cuya rigidez puede modificarse aplicando un campo magnético. El extremo inferior de la tira está firmemente anclado a una base; el extremo superior puede doblarse hacia la izquierda o la derecha. Al someter la tira a un campo cuya intensidad se hace variar de forma periódica con una frecuencia próxima a un ciclo por segundo, la tira se cimbrea caóticamente. Un segundo campo magnético actúa de parámetro de control.

Nuestro propósito era convertir el movimiento caótico de la tira en un movimiento periódico por aplicación del método OGY. Necesitábamos en primer lugar obtener el mapa de Poincaré del atractor caótico del sistema. El mapa fue creado registrando una vez la posición de la tira por cada ciclo de excitación, esto es, con la misma frecuencia con que era modulado el campo magnético. Se utilizó un ordenador para almacenar y analizar el mapa, y se calculó a continuación cómo debía ser modificado el parámetro de control para que el sistema siguiera una órbita de período uno a través del espacio de estados. Descubrimos que, a pesar de los "ruidos" y de la imprecisión de las medidas, la tira podía ser fácilmente controlada en torno a una órbita inestable de período uno de la región caótica. Sentimos verdadera sorpresa al ver cuán fácil era poner en práctica el caos y sacarle partido.

La tira permaneció bajo control sin fallo alguno durante tres días, al cabo de los cuales nos aburrimos y nos propusimos otra cosa. Intentamos que el sistema fallase aportándole un ruido externo, modificando sus parámetros. Tuvimos éxito, además, en obligar al sistema a seguir órbitas de período uno, de período dos y de período cuatro, y pudimos conmutar a voluntad entre unos y otros comportamientos.

Como suele ocurrir en la investigación científica, los descubrimientos siguen sendas insospechadas. Earle R. Hunt, de la Universidad de Ohio, supo de nuestros experimentos y decidió tratar de controlar el caos en un circuito electrónico. El circuito de Hunt fue construido con componentes comerciales, fáciles de encontrar. Logró que el sistema describiera órbitas de hasta período 23 y excitarlo con frecuencias de hasta 50.000 ciclos por segundo. Hunt no sólo consiguió demostrar que el caos es controlable en los circuitos electrónicos, sino que puso de manifiesto que es posible realizar progresos científicos con presupuestos reducidos.

El controlador de caos de Hunt, que utiliza una variante del método OGY, tiene la ventaja de que elimina la necesidad de obtener una sección de Poincaré; la información que el controlador necesita se obtiene directamente de medidas del comportamiento caótico. El circuito de Hunt permite la manipulación de caos en sistemas que cambian rápidamente. Armado con estos resultados, Hunt asistió en octubre de 1991 a la primera Conferencia sobre Caos Experimental sin saber que había resuelto un problema de cuya existencia no tenía noticia.

Hunt había vencido un problema que tenía empantanados a Rajarshi Roy y a sus colegas del Instituto de Tecnología de Georgia. Roy estudiaba los efectos de un cristal "duplicador" sobre la luz láser. El cristal duplica la frecuencia de la luz incidente, o lo que es lo mismo, reduce a la mitad su longitud de onda. El láser que utilizaba Roy generaba luz infrarroja de 1064 nanómetros de longitud de onda, y el cristal la convertía en luz verde de 532 nanómetros. Sin embargo, el cristal no funcionaba perfectamente. Cuando el cristal duplicador se orientaba de ciertas formas, la intensidad de la luz verde fluctuaba caóticamente.

Roy ansiaba controlar el caos en el sistema de láser, pero sabía que el método OGY no serviría en su caso, pues obtener la sección de Poincaré para el sistema era difícil y nada práctico. Además, Roy tenía serias dudas de que un ordenador pudiera efectuar los cálculos a velocidad suficiente para que se pudiese poner en práctica el método OGY. Felizmente, conoció el trabajo de Hunt en la conferencia. Antes de dos semanas, Roy le había construido a su láser un prototipo de controlador que, para asombro suyo y de su equipo, funcionó a la primera. Al cabo de pocos días controlaban períodos de valor 23 y trabajaban con frecuencias de excitación de 150.000 ciclos por segundo.

Roy demostró que podía controlar las fluctuaciones caóticas de la intensidad del láser y estabilizar oscilaciones inestables de período elevado. La energía del láser podía así volcarse en las frecuencias deseadas, en vez de quedar repartida por una amplia banda de frecuencias. (Roy

también ha empleado esta técnica para eliminar casi completamente las fluctuaciones de intensidad de su sistema láser.) Gracias a esto es posible diseñar sistemas láser más versátiles y estables que lo que hayan podido ser hasta ahora.

El campo de la investigación del láser se ha beneficiado además de otros avances en el control del caos. El equipo compuesto por Ira Schwartz, Ioana Trindaf, Carroll y Pecora puso a punto, en el Laboratorio de Investigaciones Navales, un método que recibe el nombre de "seguimiento" (*tracking*), cuya finalidad es extender la banda en la que se puede mantener el control del caos. El seguimiento compensa los cambios que sufren los parámetros a medida que el sistema envejece o cuando, lentamente, por una u otra razón, derivan.

En los últimos meses se ha aplicado el seguimiento a circuitos caóticos y a láseres, con resultados impresionantes. Por ejemplo, si no se adaptan los parámetros del mecanismo de control, el láser sólo se mantiene estable para una gama de potencias muy estrecha. Gracias al seguimiento se ha mantenido el control sobre un abanico de potencias mucho más amplio y se ha visto que se puede multiplicar por 15 la potencia emitida.

Un problema que presenta el método OGY es el del tiempo de espera, inaceptablemente largo, mientras el sistema tiende de forma natural hacia la órbita deseada en el atractor caótico. El grupo de Troy Shinbrot, de la Universidad de Maryland y del Centro de Guerra Naval, ha presentado una técnica que desplaza rápidamente el sistema caótico desde un estado inicial arbitrario hasta una órbita deseada en el atractor; cuando Shinbrot y sus colaboradores pusieron en práctica su método en el experimento de la tira magnéticamente excitada, redujeron el tiempo necesario para la obtención de órbitas inestables hasta 25 veces.

Otra colaboración nacida de la primera Conferencia sobre Caos Experimental condujo a la primera técnica de control del caos en un sistema biológico. El equipo, en el que nos contábamos Ditto, Spano, Alan Garfinkel y James N. Weiss, estudió una porción aislada de un corazón de conejo. Pudimos inducir contracciones rápidas e irregulares del músculo cardíaco inyectando una droga llamada *ouabain* en las arterias coronarias. En cuanto se inició la arritmia, estimulamos el corazón con señales eléctricas generadas según un esquema que adaptamos a partir del método OGY. Estas señales aparentemente aleatorias bastaron para establecer un ritmo regular en los latidos, y en ocasiones, para reducir la frecuencia cardíaca a niveles normales. Por otra parte, ni las señales aleatorias, ni las periódicas conseguían detener la arritmia, y en ocasiones la agravaban.

Se ha empezado ya a estudiar si alguna variante del método OGY podría servir para controlar arritmias en el corazón humano. Se sospecha que la técnica podría ser aplicable a la fibrilación atrial o ventricular, en la cual los ventrículos y aurículas del corazón se contraen irregularmente y dejan de bombear sangre de la manera debida. Cabe en lo posible que en un futuro cercano se pongan a punto marcapasos y desfibriladores que saquen provecho de las técnicas de control del caos.

Científicos e ingenieros no están sino empezando a valorar las ventajas que entraña el diseño de dispositivos que aprovechen la no linealidad y el caos en lugar de rehuirlos. Mientras que los sistemas lineales propenden a hacer bien una sola cosa, es muy posible que los sistemas no lineales sean capaces de habérselas con varias tareas. Las aplicaciones no lineales prometen mayor flexibilidad, respuesta más rápida y comportamientos inesperados. A medida que prosiga la investigación de la no linealidad inherente a los sistemas físicos y naturales, es posible que aprendamos no sólo a convivir con el caos, no sólo a comprenderlo, sino también a dominarlo.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

SYNCHRONIZATION IN CHAOTIC SYSTEMS. L. M. Pecora y T. L. Carroll en *Physical Review Letters*, vol. 64, n.º 8, págs. 821-824; 19 de febrero de 1990.

CONTROLLING CHAOS. Edward Ott, Celso Grebogi y James A. Yorke, en *Physical Review Letters*, vol. 64, n.º 11, págs. 1196-1199; 12 de marzo de 1990.

EXPERIMENTAL CONTROL OF CHAOS, W. L. Ditto, S. N. Rauseo y M. L. Spano, en *Physical Review Letters*, vol. 65, n.º 26, págs. 3211-3214; 24 de diciembre de 1990.

CONTROLLING CARDIAC CHAOS. A. Garfinkel, M. L. Spano, W. L. Ditto y J. N. Weiss, en *Science*, vol. 257, págs. 1230-1235; 28 de agosto de 1992.

PROCEEDINGS OF THE 1ST EXPERIMENTAL CHAOS CONFERENCE. Dirigido por Sandeep Vohra, Mark Spano, Michael Schlesinger, Lou Pecora y William Ditto. World Scientific, 1992.

Dieta y evolución de los primates

Muchas características de los primates modernos, y también de nuestra propia especie, arrancan del comportamiento alimentario de un antepasado remoto, que vivía en la bóveda de la selva tropical

Katharine Milton

Veinte años atrás, se admitía todavía que los simios, monos y prosimios hallaban en la bóveda de la selva tropical una despensa repleta e inmediata. Les bastaba con alargar la mano para sacar de la alacena hojas, flores, frutos y otros componentes de árboles y lianas, su alimento. La investigación acometida desde entonces sobre la vida real de los animales arborícolas ha desmentido, sin embargo, esa idea arraigada.

En mis propios trabajos de campo he recogido abundante documentación de cuán difícil resulta, en verdad, obtener una adecuada alimentación en la bóveda arbórea (allí donde los primates evolucionaron). Esta investigación, en unión con las aportaciones complementarias de otros expertos, ha puesto de manifiesto un punto más: las estrategias adoptadas por los primates primitivos para enfrentarse a las dificultades alimentarias del ambiente arbóreo influyeron poderosamente en la trayectoria evolutiva del orden Primates, en particular la de los antropoides (monos, simios y seres humanos).

La dieta actual del hombre, sobre todo si nos referimos a las naciones industrializadas, dista mucho de la preferida por los antropoides desde su aparición; basábase ésta en las plantas. Esa comprobación abona la sospecha de que muchos problemas de salud comunes en la naciones avanzadas procedan, al menos en parte, de una desconexión entre nuestra dieta y aquella a la que nuestro cuerpo se fue adaptando en un proceso de millones de años. Todos los datos disponibles, resumiría yo, vendrían a contarnos la evolución de los primates en términos alimentarios.

KATHARINE MILTON enseña antropología en la Universidad de California en Berkeley. Después de doctorarse por la de Nueva York en 1977, pasó tres años realizando estudios de campo sobre el comportamiento alimentario de los monos aulladores y araña.

Esta historia comenzó hace 55 millones de años largos. Los bosques de angiospermas se habían extendido por toda la Tierra durante el Cretácico tardío (desde hace 94 hasta hace 64 millones de años). Por aquella época, un micromamífero insectívoro, con aires de musaraña arborícola, trepó a los árboles; buscaba su ración de insectos distribuidores de polen. Se acomodaron sus descendientes a las partes comestibles de la vegetación de la bóveda arbórea, y ese cambio preparó el escenario para la aparición del orden Primates.

La selección natural privilegia los rasgos que permiten obtener mejor el alimento. En consecuencia, conforme iba ganando importancia la dieta vegetal, en un proceso evolutivo de millones de años, la selección configuraba la serie de rasgos que ahora definen a los primates. La mayoría de tales características facilitan el movimiento por los árboles y la recolección de alimento allí. A modo de muestra, la selección produjo manos prensiles, que cortan ramitas y manipulan las exquisiteces que alcanzan.

La presión de selección apostó también por un elaborado refinamiento del aparato visual (percepción de la profundidad, mayor agudeza y visión del color), gracias a lo cual los primates se movían rápidamente por el espacio tridimensional de la bóveda arbórea de la selva y percibían con facilidad la presencia de frutos maduros o de hojas pequeñas y jóvenes. La selección primó, por tanto, una mayor flexibilidad en la conducta, así como la capacidad de aprender y recordar la identidad y la localización de partes comestibles de plantas. Los beneficios alimentarios que conferían el progreso en la visión y el conocimiento promovieron, a su vez, el desarrollo de un cerebro insólitamente grande, rasgo distintivo de los primates desde su aparición.

En el curso de la evolución, los primates fueron diferenciándose en varias estirpes: primero los prosimios, la mayoría de los cuales se extinguiría, y luego los monos y los simios. Cada linaje surgió en respuesta a las presiones de un nicho alimentario algo distinto; se precisan habilidades peculiares para convertirse en un recolector eficiente de un subconjunto particular de alimentos en la bóveda. Con el tiempo, nuevas presiones alimentarias sobre algún precursor del hombre prepararían el camino para el desarrollo de los humanos modernos. Somos, pues, y en gran medida, lo que comemos.

Mi interés por el papel de la dieta en la evolución de los primates se remonta a 1974. Andaba todavía cavilando sobre el tema a escoger para mi tesis doctoral, cuando visité la selva tropical de la isla panameña de Barro Colorado. Estudios realizados allí en monos aulladores de manto *(Alouatta palliata)*, por los años treinta, habían reforzado, sin querer, la idea de que los primates gozaban de una vida fácil en la bóveda arbórea.

Durante las primeras semanas de seguimiento de los aulladores, me di ya cuenta de que no se comportaban a tenor de esa regla: aposentados en un árbol y llevándose a la boca lo que crecía a su vera. Antes bien, salían en busca de alimentos específicos, al tiempo que rechazaban un número notable de bocados de aparente interés. Descubierto su alimento preferido, no se saciaban, sino que parecían impelidos a compaginarlo con una mezcolanza de hojas y frutos de diversas especies.

No había tal vida muelle. Me propuse ahondar en los problemas que afrontan aulladores y otros antropoides a la hora de cubrir sus requerimientos nutritivos en la selva. Esperaba, asimismo, identificar qué

estrategias habían seguido en su evolución para habérselas con las dificultades y sortearlas.

Los retos se presentan de muchas formas. Las plantas no pueden huir de los depredadores, pero han desarrollado otras defensas para evitar la pérdida de sus componentes comestibles: taninos, alcaloides y terpenoides. En el mejor de los casos, estos compuestos secundarios tienen un sabor desagradable; en el peor, son letales.

Las células vegetales están rodeadas por paredes de fibra, cuyas sustancias componentes resisten la degradación por parte de las enzimas digestivas de los mamíferos. Los constituyentes fibrosos de la pared celular, entre los que se cuentan los carbohidratos estructurales (celulosa y hemicelulosa) y la lignina, confieren a la pared celular su forma, dureza y robustez. Resulta desconcertante la ingesta excesiva de fibra; la fibra sin digerir no aporta energía y ocupa, por contra, espacio en el tubo digestivo. Hasta que se excreta, pues, impide la ingestión de alimentos más nutritivos. Como se verá, muchos primates, hombre incluido, consiguen extraer cierta cantidad de energía, o calorías, de la fibra a pesar de carecer de enzimas degradadoras. Pero el proceso tarda y no se halla, por tanto, exento de posibles problemas.

Las dificultades alimentarias que oponen árboles y trepadoras no terminan aquí. Muchos alimentos vegetales carecen de uno o varios de los nutrientes que requieren los animales, como pueden ser ciertas vitaminas o aminoácidos (elementos de las proteínas), o son pobres en hidratos de carbono de fácil digestión (almidón y azúcar), que proporcionan glucosa y, por ende, energía. En resumen, los animales que dependen de las plantas para cubrir sus requerimientos nutritivos diarios han de buscar fuentes complementarias de nutrientes, lo que complica bastante la recolección de alimento.

Así, la mayoría de los primates arborícolas, que se abastecen de frutos maduros y hojas, suelen completar su ingesta herbívora con insectos y otra materia animal. Los frutos, de gran calidad (ricos en formas digeribles de carbohidratos y pobres en fibra), proporcionan poca proteína. Todos los animales precisan, sin embargo, una cantidad mínima de ésta para vivir; los frugívoros se ven, pues, obligados a contar con fuentes adicionales de aminoácidos. Ocurre, además, que los alimentos de mayor calidad suelen ser también allí los más escasos. Las hojas, más abundantes que los frutos y portadoras de más proteína, son de calidad inferior (tienen menos energía y más fibra) y presentan una probabilidad mayor de incluir sustancias químicas indeseables.



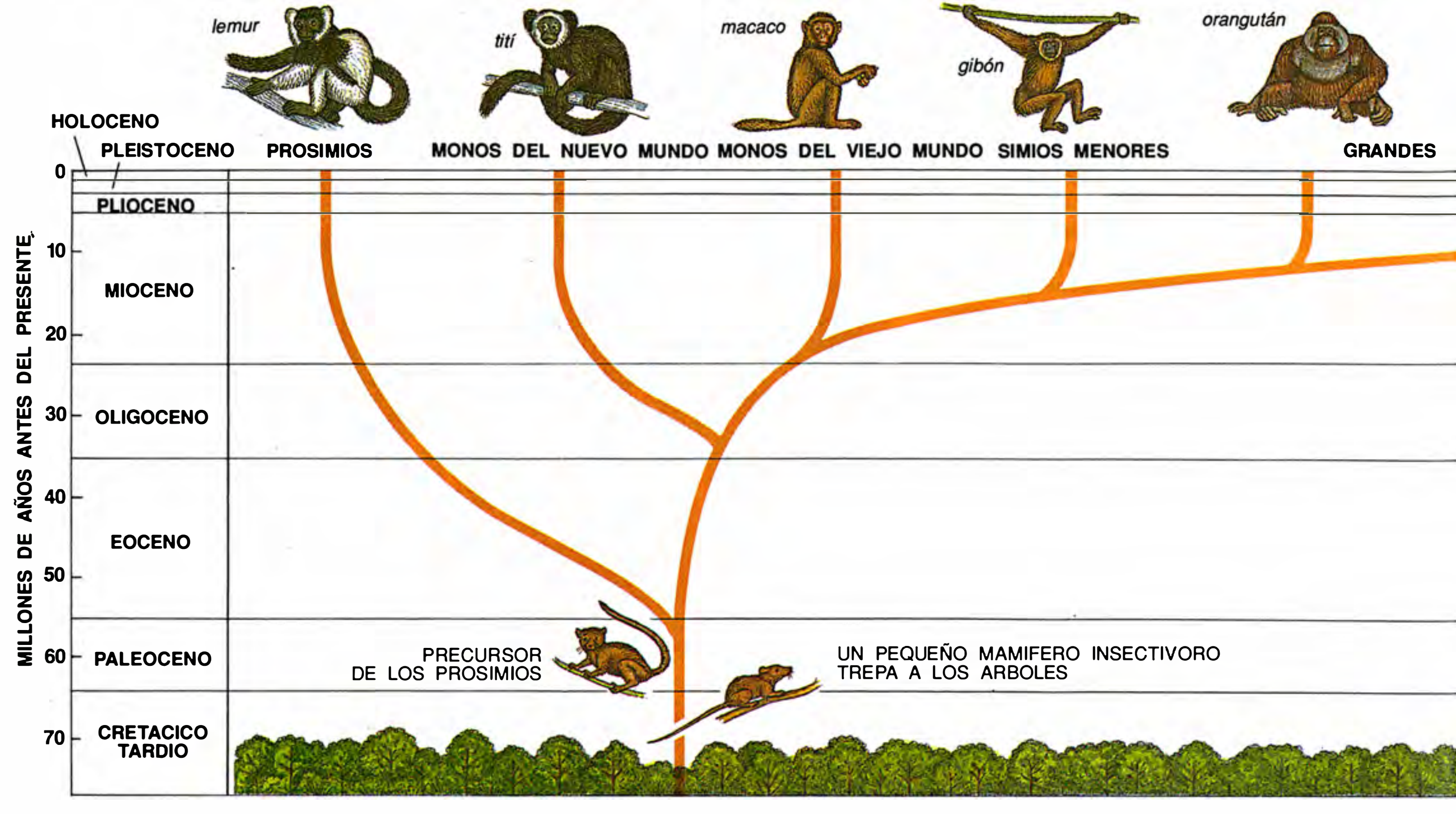
1. JOVENES CHIMPANCES BUSCAN FRUTOS MADUROS para su dieta. Hecha principalmente de éstos, la complementan con hojas y alguna presa animal. No les resulta nada fácil a los primates obtener los alimentos necesarios para una nutrición adecuada en la selva tropical. Las soluciones adoptadas hace millones de años influyeron mucho sobre la evolución subsiguiente del orden Primates.

La necesidad de mezclar alimentos de origen vegetal se agudiza por culpa de la distancia que media de un árbol a otro de la misma especie en la selva, con cientos de especies arbóreas. El animal que se limitara a una sola especie debería invertir un enorme esfuerzo yendo de un pie al siguiente. Lo que es más importante, los árboles presentan máximos y mínimos estacionales en la producción de frutos y hojas tiernas, las preferidas, lo que de nuevo hace insostenible circunscribirse a una especie.

Desde una perspectiva evolutiva, existen dos estrategias básicas para abordar este abanico de problemas que se le plantean al herbívoro emergente. En una, predomina la morfología: a lo largo de un período dilatado de tiempo, la selección natural podría favorecer la adquisición de especializaciones anatómicas (del tubo digestivo, en particular) que ahorren tiempo y energía en la búsqueda de los alimentos de la mayor calidad. Es decir, las adaptaciones morfológicas permiten depender de partes de la planta que son ubicuas, como las hojas maduras (disponibles, aunque su calidad no sea muy elevada).

Los monos colobinos, primates de Africa y Asia, ofrecen un ejemplo excelente de esta estrategia. A diferencia del tubo digestivo del primate típico (incluido el ser humano), con su estómago ácido simple, el de los colobinos presenta un estómago compartimentado, o saculado, que es funcionalmente análogo al de vacas y otros rumiantes. Gracias a esa especialización anatómica, procesan la fibra con un rendimiento extraordinario.

Las hojas masticadas fluyen, a través del esófago, hacia el estómago anterior, uno de los dos compartimentos de su estómago. En este estómago anterior alcalino, las bacterias celulolíticas realizan lo que las enzimas digestivas de los monos no



2. ARBOL EVOLUTIVO del orden Primates; sus raíces se originan en el Cretácico tardío, cuando un micromamífero insectívoro trepó a los árboles para aprovechar las oportunidades alimentarias que le ofrecía la expansión de los bosques de angiospermas. Al tiempo que los descendientes de este mamífero (*representación artística a la izquierda del árbol*) se adaptaban a un nicho alimentario nuevo en la bóveda arbórea, desarrollaron rasgos que ahora se consideran característicos de los primates, como el hocico redondeado y uñas (en vez de garras). Estos descendientes dieron origen

pueden hacer: degradar la fibra. En un proceso de fermentación, las bacterias descomponen la celulosa y la hemicelulosa de las paredes celulares de las plantas, aprovechando esas sustancias como fuente energética para desarrollar su actividad. Mientras consumen la fibra, las bacterias liberan ácidos grasos volátiles, que atraviesan la pared del estómago y llegan al torrente sanguíneo, donde proporcionan energía para los tejidos corporales o son enviados al hígado para su conversión en glucosa. Algunos creen que el estómago anterior de los colobinos podrían participar en la detoxificación de compuestos secundarios dañinos de los alimentos vegetales.

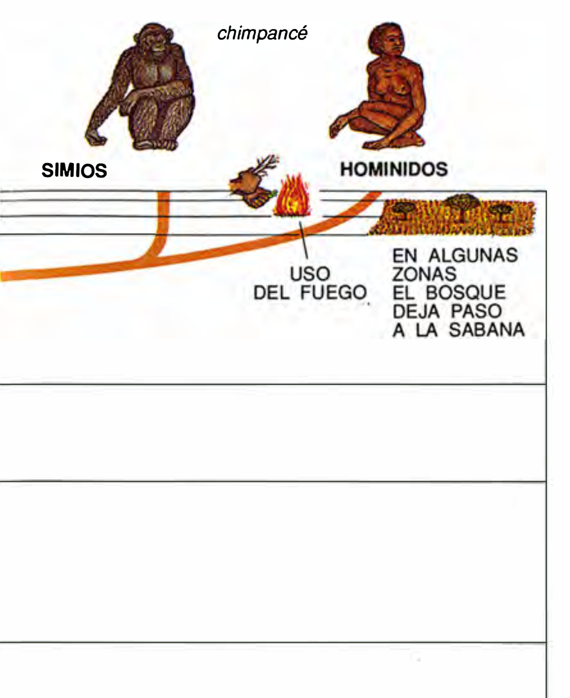
La eficaz extracción de nutrientes de los alimentos fibrosos se refuerza con otro proceso. Cuando las bacterias celulolíticas mueren, abandonan el estómago anterior y pasan al segundo compartimento, un estómago ácido simple parecido al nuestro. Allí, enzimas especiales (lisozimas) degradan la pared de la célula bacteriana: proteínas y otros materiales nutritivos que componen las bacterias celulolíticas quedan a disposición del metabolismo digestivo de los monos. (En cierto sentido, pues, los colobinos no se alimentan directamente de las hojas masticadas y tragadas, sino de los productos del proceso de fermentación y de los nutrientes que proporcionan los fermentadores.)

En el hombre, lo mismo que en la mayoría de los demás primates, la fibra pasa sin apenas cambios a través del estómago ácido y del intestino delgado (donde se absorben la mayoría de los nutrientes) hacia el tubo digestivo posterior (el ciego y el colon). Una vez la fibra alcanza el tubo digestivo posterior, las bacterias celulolíticas pueden degradar parte de ella. Mas, para la mayoría de los primates, comer copiosas cantidades de fibra no confiere los mismos beneficios que en los especializados colobinos.

Otro cambio morfológico que facilita la supervivencia con partes vegetales de baja calidad se refiere a la adquisición paulatina de un tamaño mayor. Comparados con los animales pequeños, los grandes deben consumir mayores cantidades absolutas de alimento para nutrir su correspondiente masa de tejido. Ahora bien, por razones no del todo aclaradas, los mayores pueden obtener una alimentación adecuada tomando menos energía por unidad de masa corporal. Esta demanda energética relativamente menor significa que los individuos grandes pueden cubrir sus requerimientos energéticos con alimentos de baja calidad. Pero la adquisición creciente de talla tiene un tope; si los arborícolas se agrandan mucho, corren el riesgo de romper las ramas y caerse al suelo.

La segunda estrategia básica que se les brinda a los herbívoros se refiere al comportamiento. Las especies pueden optar por alimentarse selectivamente sólo de los alimentos vegetales de mayor calidad. Ante la escasez de éstos y su distribución heterogénea en la selva, tal estrategia requiere la adopción de conductas que ayuden a minimizar la inversión en la procura de los recursos. Se ganaría muchísimo con una buena memoria; la capacidad para recordar el lugar exacto donde están los árboles que producen frutos deseables y de rememorar las rutas más cortas para llegar a ellos aumentaría la eficiencia de la alimentación al reducir los costes de búsqueda y desplazamiento. También lo haría saber el tiempo de fructificación. Tales beneficios pudieron haber instado la selección en pro de un cerebro mayor, con más superficie para el almacenamiento de la información.

La estrategia morfológica no ex-



a los primates verdaderos, empezando por los prosimios. Nuestro propio género, *Homo*, surgió durante el Plioceno. Las fechas exactas de las radiaciones están sujetas a debate.

cluye la conductual, ni al revés. Aunque una u otra priman en grado diverso según las especies, el grupo de los primates ha apostado, en general y de manera más clara, por la alimentación selectiva valiéndose de la adquisición de un cerebro mayor. En cambio, otros órdenes de herbívoros se han quedado, de forma casi exclusiva, con la adaptación morfológica.

Comencé a entrever las consecuencias evolutivas de la alimentación selectiva a mediados de los años setenta, cuando observé que los monos aulladores de manto y los monos araña rojos o micos *(Ateles geoffroyi)*, dos especies de primates del Nuevo Mundo, optaban por dietas distintas. Los monos aullador y araña, que divergieron a partir de un antepasado común, comparten un mismo tamaño aproximado, un estómago simple, no saculado, un hábito arborícola y una dieta vegetariana casi exclusiva, que en su mayor parte está constituida por frutos y hojas. Comprobé, sin embargo, que la base fundamental de la dieta del aullador en Barro Colorado eran hojas inmaduras, mientras que la base fundamental de la dieta del mono araña eran frutos en sazón.

Durante la mayor parte del año, los aulladores dividían su tiempo diario de alimentación, en fracción casi igual, entre hojas recientes y frutos. En las estaciones de baja disponibilidad de frutos, limitaban su ingesta a las hojas. Por su lado, los monos araña consumían frutos en sazón durante la mayor parte del año, comiendo sólo pequeñas cantidades de hojas; cuando los frutos escaseaban, no se contentaban, a imagen de los aulladores, en llenar el vacío con hojas. Su ingesta de hojas aumentaba, pero se las arreglaban para abastecerse de cantidades considerables de fruta. Para ello, acometían un rastreo minucioso de todas las fuentes de frutos; recogían incluso nueces de palma que no habían entrado en sazón todavía.

Estas observaciones planteaban varias preguntas. ¿Cómo obtenían los aulladores suficiente energía durante los meses en que vivían sólo de hojas? Dijimos antes que buena parte de la energía de las hojas está asociada a fibra, inaccesible a las enzimas digestivas de los primates. Además, ¿por qué comían aquéllos tanto follaje si tenían acceso a frutos maduros?

E igualmente: ¿por qué modificaban sus rutinas los monos araña para encontrar frutos durante los períodos de escasez? ¿Qué les impedía contentarse con las hojas, a la manera de los aulladores? ¿Cómo satisfacían sus requerimientos proteínicos diarios con su dieta rica en frutos? (Recuérdese que los frutos contienen pocas proteínas.)

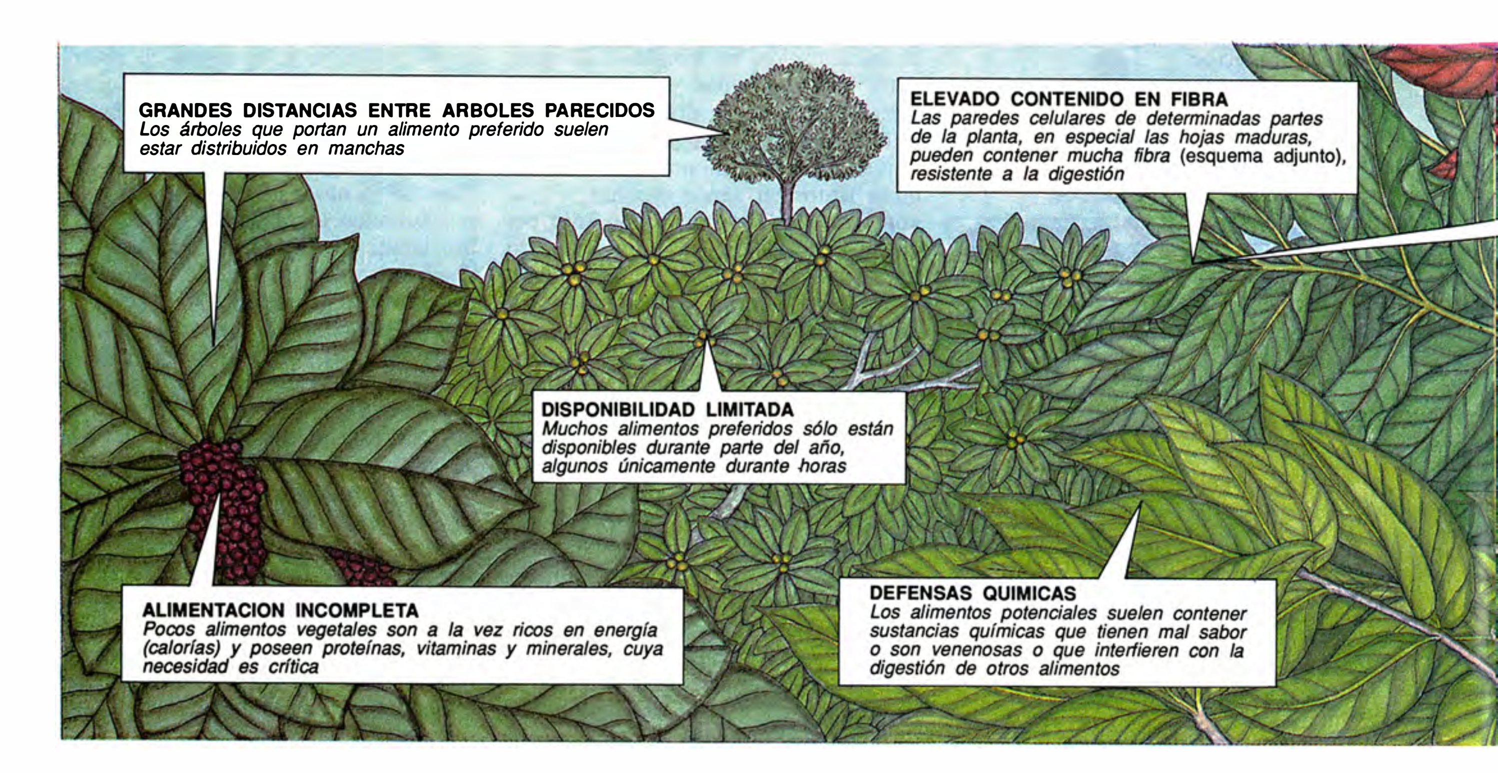
Dado el parecido morfológico externo entre aullador y araña, supuse que tras su comportamiento dispar yacía algún rasgo interno distintivo (quizá la estructura del tubo digestivo o el rendimiento de la digestión). Así era. Los ensayos en los que di de comer frutos y hojas a sujetos experimentales temporalmente enjaulados revelaron que los aulladores digerían la comida más despacio que los araña. Los aulladores empezaron a eliminar marcadores de plástico incrustados en el alimento a las 20 horas de haber comido; los araña expulsaban los inocuos marcadores a las cuatro horas. El examen del tamaño del tubo digestivo evidenció la causa de la dispar tasa de tránsito. El colon de los aulladores era bastante más ancho y largo que el de los monos araña, lo que significa que la comida ha de recorrer un trecho mayor y que puede retenerse un volumen significativamente mayor.

Estos resultados nos indicaban que los aulladores podían sobrevivir de hojas porque estaban más versados en fermentar fibra en el ciego y el colon. Procesaban la comida lentamente, lo que daba a las bacterias en el espacioso tubo digestivo posterior la posibilidad de producir ácidos grasos volátiles en cantidad. Experimentos que realicé posteriormente con Richard McBee, de la Universidad de Montana, confirmaron que los aulladores recababan hasta el 31 por ciento de la energía que precisan diariamente de los ácidos grasos volátiles de la fermentación.

En cambio, los monos araña, al hacer pasar el alimento más deprisa a través de su colon, corto y estrecho, obtenían un rendimiento menor a la hora de extraer energía de la fibra de su dieta. Pero la velocidad les permitía, en contrapartida, mover cada día masas de alimento a través del tracto gastrointestinal. Al escoger frutos, que son muy digeribles y ricos en energía, conseguían todas las calorías y algo de la proteína que necesitaban. Completaban su dieta básica de pulpa de fruta con unas cuantas hojas jóvenes muy seleccionadas que suministraban el resto de la proteína que requerían, sin un exceso de fibra.

Los monos aulladores nunca se circunscriben a los frutos, en parte incluso porque sus reducidas tasas de tránsito les impedirían procesar toda la fruta que necesitarían para cubrir sus requerimientos energéticos diarios. Y la cantidad de frutos que podrían consumir no proporcionaría la proteína suficiente. Por contra, los monos araña deben comer fruta porque su tubo digestivo no está preparado para suministrar grandes cantidades de energía a partir de las hojas en fermentación; la fermentación eficiente requiere que el material vegetal permanezca cierto tiempo en el tubo digestivo.

Por suerte, había escogido dos especies que se encontraban en extremos opuestos del *continuum* entre tránsito lento y tránsito rápido de alimento. Sabemos hoy que la mayoría de los primates pueden situarse en algún punto de esa línea, según tiendan a maximizar la eficiencia con la que digieren una comida o a maximizar el volumen de alimento que se procesa en un día. Hemos demostrado, además, que no se exigen cambios espectaculares en el tracto digestivo: bastan ajustes sutiles en el tamaño de diferentes segmentos del tubo digestivo para compensar los problemas de nutrición que plantean las elecciones dietarias. Sin embargo, las compensaciones morfológicas en el tubo digestivo pueden tener sus inconvenientes y hacer, por ejemplo, que a una especie le sea más difícil alterar sus hábitos en unas condiciones ambientales que cambien de repente.



Quedé fascinada ante esas adaptaciones digestivas. Pero mi ¡Eureka! saltó cuando comparé el tamaño del cerebro de las dos especies. Había buscado información sobre ese dato porque los monos araña de Panamá parecían más "listos" que los aulladores: casi humanos. Me pregunté si aquéllos se comportaban como lo hacían porque su cerebro se parecía más al nuestro. Aulladores y araña diferían, comprobé, en la talla de su cerebro, aun cuando su tamaño corporal viene a coincidir. (Los animales del mismo tamaño suelen tener cerebros de tamaño semejante.) El cerebro del mono araña pesaba alrededor del doble que el de los aulladores.

El cerebro es un órgano costoso de mantener; se lleva una cantidad desproporcionada de la energía (glucosa) que se extrae del alimento. La selección natural no habría apostado por un cerebro grande, a menos que los monos araña sacaran con ello un beneficio claro. Puesto que la separación más notoria entre unos y otros residía en la dieta, pensé que se primó el agrandamiento cerebral de los monos araña para facilitar el desarrollo de capacidades mentales que asegurasen el éxito en su régimen alimentario centrado en frutos en sazón.

Un cerebro grande les habría ayudado a aprender y, lo que es más importante, a recordar, dónde se hallaban los árboles con frutos, de distribución heterogénea, y cuándo podía comerse esta o aquella fruta. En su búsqueda, peinan la selva divididos en grupúsculos inestables. Esa mayor capacidad mental ampliada les permitiría reconocer a los miembros de su unidad y aprender el significado de las llamadas relacionadas con la comida mediante las cuales la banda transmite, desde notable distancia, las nuevas de su rastreo.

Los monos aulladores, por contra, no necesitarían tanta memoria, ni precisarían de un sistema de reconocimiento y comunicación tan complejo. Buscan la comida agrupados en una unidad social cohesionada, que sigue sendas arbóreas trilladas en un área de distribución mucho menor.

Si yo tenía razón en que la presión para obtener alimentos no fáciles de encontrar y de gran calidad favorece el desarrollo de la complejidad mental (recompensada con un forrajeo más rentable), lo racional era que hubiera diferencias similares, en punto al cerebro, en otros primates; monos y simios que se concentran en frutos en sazón deberían presentar un cerebro mayor que sus congéneres folívoros, a igualdad de tamaño corporal. Para comprobar esta hipótesis, hurgué en los datos morfométricos comparativos que había publicado Harry J. Jerison, de la Universidad de California en Los Angeles. Vi que las especies de primates que comen alimentos de gran calidad y muy dispersos suelen desarrollar, a igualdad de talla, un cerebro mayor que sus congéneres que se alimentan de recursos de menor calidad y distribuidos de manera más uniforme.

He mencionado que los primates poseen un cerebro mayor que el de otros mamíferos de tamaño similar. Ello obedece, en mi opinión, a sus hábitos alimentarios selectivos: prefieren las partes más nutritivas de las plantas. Hasta los primates folívoros optan por las láminas tiernas, o sólo la punta, de bajo contenido en fibra, de las mismas.

Identificadas ya esas relaciones entre presiones alimentarias y evolución de los primates no humanos, sentí curiosidad por el papel de tales presiones en la evolución humana. El vistazo general que eché al registro fósil de la familia Homínidos (los seres humanos y sus precursores) me aportó algunas pistas sugestivas.

Australopithecus, el primer género de nuestra familia, surgió en Africa hace más de 4,5 millones de años, durante el Plioceno. Los australopitecos eran ya bípedos, pero su cerebro no superaba significativamente el de los simios actuales; la selección no había, pues, empezado a decantarse por un aumento del cerebro. El registro fósil indica también que *Australopithecus* poseía molares robustos, idóneos para una dieta de materia vegetal dura. Hacia el final del Plioceno, comenzaron a cambiar las condiciones climáticas. Le siguió el Pleistoceno (que duró desde hace unos dos millones de años hasta hace 10.000 años), caracterizado por glaciaciones repetidas en el hemisferio norte. A caballo de las dos épocas, las selvas tropicales se contrajeron, sustituidas en muchas regiones por sabanas forestadas.

Conforme disminuía la diversidad de las especies arbóreas y el clima se tornaba más estacional, los primates



	CALORIAS FACILMENTE ACCESIBLES	PROTEINA	FIBRA	DEFENSAS QUIMICAS	DISPONIBILIDAD EN UN ARBOL DADO
FLORES	Moderada	Moderada a alta	Baja a moderada	Variable	Menos de tres meses
FRUTOS	Alta	Baja	Moderada	Baja	Menos de tres meses
HOJAS JOVENES	Baja	Alta	Moderada	Moderada	Medio año
HOJAS MADURAS	Baja	Moderada	Alta	Moderada	Casi todo el año

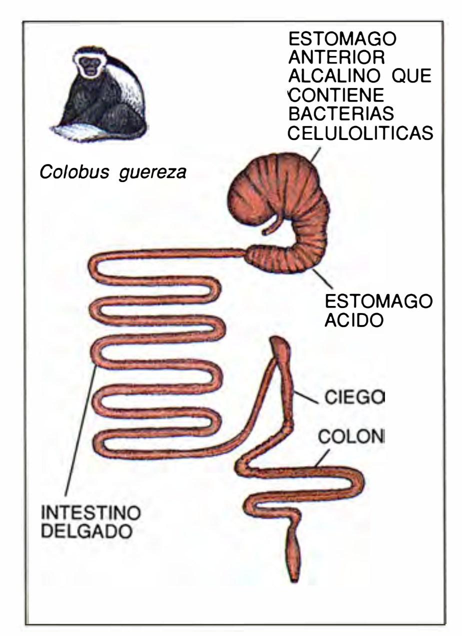
3. MUCHAS DIFICULTADES se les plantean a los primates de la selva tropical a la hora de obtener las calorías y los nutrientes que precisan a partir de las plantas (*izquierda*). Puesto que lo que se les ofrece a mano resulta inadecuado por una u otra razón, se ven obligados a escoger diariamente una variedad de alimentos. La tabla de la derecha refleja esquemáticamente la abundancia relativa de los componentes deseables (*verde*) y problemáticos (*amarillo*) en una serie de alimentos comunes. También indica la disponibilidad típica de estos alimentos en un árbol dado.

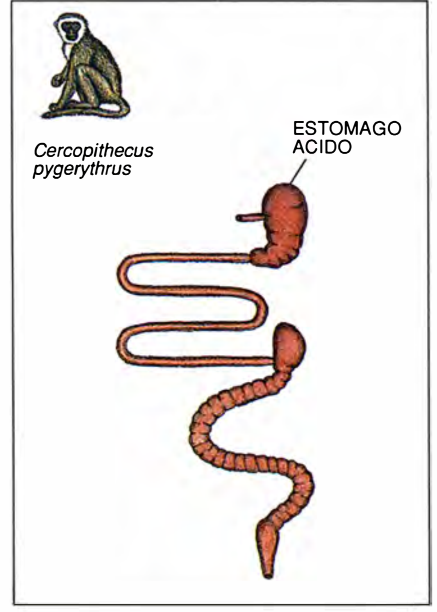
de las sabanas en expansión debieron afrontar nuevos retos alimentarios. En el Pleistoceno, se extinguieron las últimas especies de *Australopithecus* (que para entonces tenían mandíbulas y molares muy robustos). Quizá desaparecieran, opina Montague W. Demment, de la Universidad de California en Davis, porque perdieron en la competencia con los ungulados, animales especializados desde el punto de vista digestivo.

El género *Homo* surgió durante el Plioceno. La primera especie del género, *H. habilis*, tenía una talla corporal similar a la de *Australopithecus*, pero poseía un cerebro bastante mayor. Esta especie fue sustituida por otra de superior tamaño cerebral, *H. erectus*, y después, en el Pleistoceno, por *H. sapiens*, que posee el mayor cerebro de todas ellas. Paralelos a esa modificación, en el género *Homo* se producían otros cambios anatómicos. Redujo las medidas de molares y premolares y aumentó su tamaño corporal.

El aumento impresionante del cerebro da fe, para mí, del éxito de nuestro género; la selección reforzó una tendencia inherente en el orden Primates desde su aparición: la de usar el poder del cerebro, es decir, el comportamiento, para resolver problemas de dieta. Unido a las adaptaciones anatómicas (y sumado a la asociación en los primates actuales entre un cerebro mayor y una dieta de alta calidad), ese incremento nos lleva a la conclusión de que la estrategia conductual consistió en concentrarse en alimentos de gran calidad. A mí me parece que los primeros seres humanos no sólo mantuvieron la calidad en la dieta pese a las condiciones ambientales cambiantes, sino que incluso la refinaron.

La dilatación del cerebro, conjugada con el crecimiento de la talla y una reducción en la dentición, respaldan la hipótesis de una dieta de alta calidad. Por dos razones. Cuando observamos los gorilas y orangutanes actuales, resulta evidente que en nuestra superfamilia, los Hominoideos (simios y humanos), un aumento en el tamaño corporal combinado con una calidad alimentaria *reducida* conduce a un simio de movimientos lentos, bastante sedentario y poco social. Pero nuestros antepasados *Homo* se movían de un sitio a otro y eran sociales, más parecidos al bullicioso, social y comunicativo chimpancé. A diferencia de orangutanes y gorilas, los chimpancés comen de





4. TUBO DIGESTIVO especializado de *Colobus guereza* (*izquierda*). El estómago consta de dos compartimentos distintos. Los monos cercopitecinos (*derecha*), lo mismo que en la mayoría de los demás primates, poseen una sola cámara. En los colobinos, uno de los dos compartimentos (el estómago anterior) está preparado para extraer más energía de la fibra; pueden sobrevivir así con una dieta más fibrosa que la de otros primates de tamaño similar.

preferencia frutos maduros de alta calidad, ricos en energía.

Por lo mismo, la reducción de molares y premolares demuestra que la textura de los alimentos que comíamos se había alterado; la dentición no debía desarrollar tanto trabajo. En otras palabras, o bien estos protohumanos comían alimentos diferentes (menos fibrosos, fáciles de mascar) de los consumidos por *Australopithecus*, o bien procesaban la comida para extraer el material que sería difícil de masticar y digerir. Efectivamente, los útiles líticos que se encuentran con los restos fósiles de *H. habilis* indican que hasta los miembros más tempranos de nuestro género recurrían a la técnica para ayudarse en la preparación del alimento.

La probabilidad de que los homínidos siguieran buscando alimentos ricos en energía en el curso de su evolución sugiere un panorama interesante. Ante la dificultad presumible de hallar determinados alimentos vegetales, los humanos se dedicarían cada vez más a la carne para satisfacer sus requerimientos proteínicos. Nos los imaginamos sirviéndose de lascas cortantes para abrir pellejos y romper huesos en busca de médula. Para incorporar carne a la dieta sobre una base estable y también para reunir alimentos vegetales ricos en energía, nuestros antepasados desarrollaron una estrategia alimentaria nueva. Adoptaron la división del trabajo, por la que unos se especializaron en la caza o el carroñeo y otros en la recolección de plantas. Las provisiones se guardaban, en vez de consumirlas *in situ*; se compartían entre toda la unidad social para asegurar a todos los miembros una dieta equilibrada.

Así pues, la supervivencia del individuo vino a depender de una serie de habilidades técnicas y usos sociales. Requería no sólo poseer un cerebro capaz de formar y retener un mapa mental de los recursos alimentarios vegetales, sino saber también cómo procurárselos o transformarlos. La supervivencia exigía poder reconocer que, de un fragmento de roca, podía sacarse un útil, y fabricarlo; y precisaba ser capaz de cooperar con los demás (decidir quién debía correr delante de una cebra avistada y quién detrás, para su caza), postergar la gratificación (guardar el alimento hasta que pudiera transportarse hasta el lugar acordado para su consumo) y determinar la parte equitativa que correspondía a cada uno y, a la vez, asegurar que se recibía. Tales demandas servían indudablemente de presiones selectivas que favorecían la evolución de un cerebro creciente y más complejo.

La comunicación oral facilitaría, en un comienzo, la cooperación que se precisaba para un forrajeo eficiente y para otras tareas esenciales. Gradualmente se hizo más compleja para hacer más fluida la interacción social.

Adivino, pues, la aparición y la evolución del linaje humano surgiendo de presiones para conseguir un abastecimiento constante y fiable, de muy alta calidad y en condiciones ambientales en las que los nuevos problemas hicieron inservibles los comportamientos hasta entonces mantenidos para procurarse el alimento. Los carnívoros y herbívoros especializados que abundan en las sabanas africanas estaban evolucionando al mismo tiempo que los protohumanos, quizá forzándolos a convertirse en un nuevo tipo de omnívoro, que dependía, en última instancia, de la innovación social y técnica y, por ello, en gran medida, de la capacidad cerebral. Según Edward O. Wilson, de la Universidad de Harvard, el cerebro humano creció, durante más de dos millones de años (hasta hace unos 250.000 años), al ritmo de un volumen equivalente a una cucharada cada 100.000 años. Por lo que parece, cada cucharada de materia cerebral que se añadía al género *Homo* produjo beneficios que intensificaron su tendencia hacia el progreso técnico y social.

Aunque la práctica de añadir cierta cantidad de carne a la ingesta diaria regular se convirtió en una fuerza básica en la aparición de los seres humanos modernos, este comportamiento no significa que nos hallemos





MONO ARAÑA
(Ateles geoffroyi)

DIETA TIPICA
Frutos: *72 por ciento*
Hojas: *22 por ciento*
Flores: *6 por ciento*

PESO
Seis a ocho kilogramos

TAMAÑO DEL CEREBRO
107 gramos

RADIO DE ACCION DIARIO
915 metros

CARACTERISTICAS DIGESTIVAS
Colon pequeño
Tránsito rápido del alimento a través del colon

MONO AULLADOR
(Alouatta palliata)

DIETA TIPICA
Frutos: *42 por ciento*
Hojas: *48 por ciento*
Flores: *10 por ciento*

PESO
Seis a ocho kilogramos

TAMAÑO DEL CEREBRO
50,3 gramos

RADIO DE ACCION DIARIO
443 metros

CARACTERISTICAS DIGESTIVAS
Colon grande
Tránsito lento del alimento a través del colon

5. EL MONO ARAÑA (*izquierda*) es un especialista en frutos, mientras que el mono aullador (*derecha*) come grandes cantidades de hojas. La autora propone que la dieta desempeñó un papel fundamental a la hora de modelar los rasgos distintivos de esas dos especies de tamaño semejante, que compartieron un antepasado común. La selección natural favoreció un cerebro mayor en los monos araña, en parte porque una capacidad mental reforzada les ayudaba a recordar dónde podía haber frutos maduros. Los araña rastrean diariamente una superficie mayor porque, en cualquier retazo de bosque, los frutos maduros son menos abundantes que las hojas. Las características digestivas de los monos araña y aulladores promueven la extracción eficiente de nutrimentos de los frutos y de las hojas, respectivamente.

hoy biológicamente adaptados a la dieta sin apenas fibra que solemos consumir. No parece que nuestro tubo digestivo haya sufrido grandes modificaciones con respecto al del antepasado común de simios y seres humanos, un animal de claras tendencias herbívoras.

Sin embargo, desde mediados de la década de los ochenta no se había investigado si las funciones del tubo digestivo de los seres humanos modernos eran semejantes a las de los simios. Es posible que existieran algunas diferencias funcionales, porque la anatomía ha demostrado que, pese a la semejanza en la forma general del tubo digestivo, los humanos modernos tienen un tubo digestivo más bien pequeño para un animal de su talla. Nos distinguimos también de los simios en otro aspecto: a nuestro intestino delgado corresponde la porción mayor de tubo digestivo; al colon, en los simios.

Para conocer a qué tipo de dieta se hallaba mejor adaptado el aparato digestivo humano, Demment y yo decidimos comparar los procesos digestivos del hombre con los del chimpancé, nuestro pariente vivo más próximo. Esperábamos determinar si, en el curso de su evolución respectiva, humanos y chimpancés habían divergido por lo que concierne al metabolismo de la fibra.

Los hábitos alimentarios de los chimpancés son bien conocidos. A pesar de su habilidad para capturar presas vivas (en particular monos), estos simios obtienen un 94 por ciento de su dieta anual de las plantas, frutos maduros sobre todo. Los frutos preferidos suelen ser ricos en azúcares, contienen mucha menos pulpa y bastante más fibra y semillas que los frutos domésticos que se venden en la tienda. Por ello, calculé que los chimpancés en la naturaleza ingieren diariamente cientos de gramos de fibras, mucho más que los 10 gramos escasos que consume el occidental medio.

Varios estudios excelentes, entre ellos un proyecto sobre fibra de la Universidad de Cornell, habían proporcionado copiosa información sobre la digestión humana de fibra. No hace mucho se creía aún que nuestro tubo digestivo carecía de microbios capaces de degradar la fibra. Pero las bacterias del colon de 24 alumnos de la Universidad de Cornell resultaron ser muy eficientes a la hora de fermentar la fibra de ciertas frutas y hortalizas. En el apogeo de su actividad, las poblaciones bacterianas degradaron hasta las tres cuartas partes del material de paredes celulares que los estudiantes ingirieron; alrededor del 90 por ciento de los ácidos grasos volátiles que resultaron fueron liberados al torrente sanguíneo.



6. HAMBURGUESAS y patatas fritas, alimentos comunes de la vida moderna que, igual que muchos otros, se parecen muy poco a los frutos y hojas que la mayoría de los primates han preferido desde la aparición de nuestro orden. Se supone que también los protohumanos consumían grandes cantidades de alimento vegetal. De ahí que con frecuencia las dietas modernas diverjan mucho de aquellas a las que nuestro cuerpo parece estar adaptado.

Siguiendo el ejemplo del estudio de Cornell, Demment y yo evaluamos la eficiencia de la degradación de fibra en chimpancés a los que se daba a comer dietas nutritivas que contenían cantidades variables de fibra. En el Centro para Primates de Yerkes, en Atlanta, me pasé todo el verano con seis chimpancés extremadamente irascibles que nunca perdieron la oportunidad de tirarme del pelo, lanzarme heces y, en general, hacerme saber que no se sentían agasajados por nuestra cocina.

Nuestros resultados demostraron que el aparato digestivo del chimpancé procesa la fibra con un rendimiento muy similar al humano. Además, conforme aumenta la fracción de fibra en la dieta (lo que suele acontecer en la naturaleza durante los intervalos estacionales en la producción de frutos y hojas), chimpancé y hombre aumentan la tasa a la que el alimento transita por el tracto digestivo.

Estos paralelismos indican que, a medida que decae la calidad en la naturaleza, los seres humanos y los chimpancés se encuentran evolutivamente preparados para responder mediante el aumento de la tasa de tránsito por el tubo digestivo. Esta respuesta permite procesar una mayor cantidad de alimento por unidad de tiempo; al hacerlo así, el animal compensa la merma de calidad con mayor cantidad de comida diaria. (La investigación médica ha descubierto otro beneficio del tránsito rápido. Al acelerar el flujo de comida a través del aparato digestivo, la fibra parece evitar que los carcinógenos acechen demasiado tiempo en el colon y causen problemas.)

Si es verdad que el tracto digestivo humano se halla adaptado a una dieta rica en materia vegetal y fibra, cobra fuerza la idea de que las sociedades industrializadas comen demasiado carbohidrato refinado y poca fibra. Mi trabajo no señala cuánta fibra necesitamos, pero sí atestigua que consumimos muchísima menos que la ingerida por nuestros antepasados humanos más próximos.

Mis colegas y yo hemos analizado partes de plantas que comen los primates en libertad, para conocer su contenido en varios constituyentes, entre ellos vitamina C y pectina. Se cree que la pectina, un componente muy fermentable de la pared celular, es provechosa para la salud del hombre. Nuestros resultados sugieren que las dietas que comían los humanos primitivos abundaban en vitamina C y contenían cantidades notables de pectina. De nuevo, no sé si hemos de ingerir las mismas proporciones de estas sustancias que los primates en libertad, pero estos descubrimientos dan que pensar.

La aparición del hombre moderno se produjo, en buena medida, porque la selección natural favoreció adaptaciones que permitieron que los primates centraran su alimentación en las dietas más ricas en energía y más bajas en fibra que podían encontrar. Resulta paradójico que nuestra estirpe, que se benefició de evitar una dieta sobrada en fibra, pueda estar resintiéndose de una cuantía insuficiente de la misma en nuestra comida.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

DIGESTION AND PASSAGE KINETICS OF CHIMPANZEES FED HIGH AND LOW-FIBER DIETS AND COMPARISON WITH HUMAN DATA. K. Milton y M. W. Demment en *Journal of Nutrition*, vol. 118, n.º 9, páginas 1082-1088, septiembre de 1988.

FORAGING BEHAVIOUR AND THE EVOLUTION OF PRIMATE INTELLIGENCE. K. Milton en *Machiavellian Intelligence: Social Expertise and the Evolution of Intellect in Monkeys, Apes, and Humans*. Dirigido por Richard Byrne y Andrew Whiten. Oxford University Press, 1988.

El gran escándalo del radio

William J. A. Bailey fue enriqueciéndose gracias a su patente de una medicina que contenía radio hasta que ésta causó la muerte de un personaje. El escándalo contribuyó a la introducción de normas de regulación del uso de radioisótopos

Roger M. Macklis

Eben M. Byers murió a primeras horas de la mañana del miércoles 31 de marzo de 1932, víctima de un síndrome misterioso que había hecho estragos en su cuerpo durante dieciocho meses, corroyendo su esqueleto hasta que comenzaron a quebrarse sus huesos. Había sido un fornido deportista, experto tirador al plato; en 1907, a los 27 años, fue campeón nacional de golf de la categoría de aficionados. Presidente de la Acería A. M. Byers, magnate que había escalado las capas más altas de la sociedad neoyorquina, era la personificación de los felices años veinte. No se apeó de su vida privilegiada ni siquiera después del hundimiento de la bolsa; mantenía casa en Pittsburgh, Nueva York, Rhode Island y Carolina del Sur, y cuadras de caballos de carreras en Nueva York e Inglaterra.

Al morir, pesaba poco más de 40 kilos. Su rostro, antes lleno de juventud y de aspecto feliz, había quedado desfigurado por las cicatrices de operaciones que le habían rebanado buena parte de la mandíbula y algunas zonas del cráneo en un intento vano de detener la destrucción del hueso. La médula y los riñones le habían fallado, dando a su piel un aspecto amarillento y cadavérico. Aunque un absceso cerebral le había dejado casi mudo, permaneció lúcido casi hasta el final.

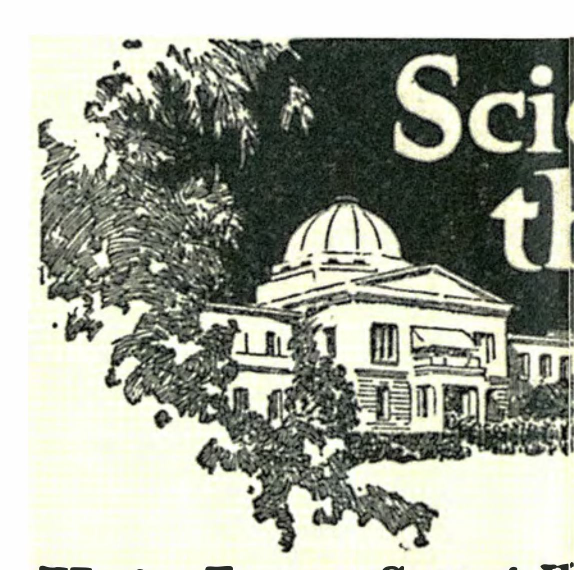
Las autoridades abrieron una investigación criminal por envenenamiento. El *New York Times* dio cuenta de los resultados preliminares con un titular en primera página: "Eben M. Byers muere de un envenenamiento por radio".

ROGER M. MACKLIS, jefe del departamento de radiación oncológica de la Fundación Cleveland Clinic, reparte su tiempo entre la práctica clínica de la radiación oncológica pediátrica y la investigación de nuevos radiofármacos contra el cáncer.

¿Envenenamiento por radio? ¿Cómo un hombre de la posición y riqueza de Byers podía haber padecido una enfermedad hasta el momento reducida a un puñado de químicos del radio y artesanas que pintaban esferas de relojes con tinta radiactiva para que brillasen en la oscuridad, chupando los cepillos para trazar líneas más finas? La respuesta a esta pregunta llamó la atención sobre un peligro que los responsables de la salud pública apenas comenzaban a entrever: pequeñas cantidades de sustancias tóxicas podían matar. El caso Byers contribuyó así a crear la presunción de que todo medicamento es peligroso mientras no se pruebe su inocuidad.

La historia radiactiva de Byers había empezado en 1927, en un tren. Metido en alguna jarana nocturna, se cayó de la litera y se hirió en el brazo. Pese a los buenos servicios de sus médicos y preparadores, se quejaba de un dolor persistente. Pronto la lesión le impidió jugar al golf (y, según se rumoreó, afectó también a su libido). Vino a dar con Charles Clinton Moyar, médico de Pittsburgh, quien le sugirió que probara el Radithor, un fármaco cuyo fabricante, el Laboratorio Bailey de Radio, de Nueva Jersey, decía que era un remedio para la dispepsia, la alta presión sanguínea, la impotencia y más de 150 enfermedades "endocrinológicas".

Desde diciembre de 1927 empezó a beber varios frascos al día. Decía sentirse rejuvenecido. Tan satisfecho estaba con los resultados que envió cajas a sus conocidos e incluso suministró en alguna ocasión el costoso específico a sus caballos de carreras. Como otros entusiastas del Radithor, parece que consumió grandes cantidades del brebaje, entre 1000 y 1500 botellines de 1927 a 1931. Debió de acumular una dosis de radiación equivalente a miles de exposiciones a los



What a Famous Savant H

New Plan to Close Up

Wipe Out Illiteracy and

Make Over the Morons

by His Method of

Gland Control

IF WE look more to the endocrine glands and less to the head, shall we be better able to eradicate insanity?

During the recent convention of the American Chemical Society at Washington, D. C., Dr. William J. A. Bailey, director of the American Endocrine Laboratories of New York, who is authority for the above statement, made some startling criticisms on the present methods of treating insane patients, and cited the case of Harry K. Thaw as substantiating his contention.

Dr. Bailey is a graduate of Harvard and the University of Vienna and enjoys a wide reputation on radioactivity and its therapeutic application. He has written the following article exclusively for this newspaper.

Dr. W. J. A. Bailey's new method for helping the insane is widely used

apt to become a cretin. thyroid to normal—or inj the secretion from the animal—and we return t a fairly normal human be tally and physically. This

1. PRETENCIOSA PROPOSICION de un remedio científico para curar todos los males, en los locos años veinte. Se refiere al Radithor, medicina con unas gotas de radio y marca patentada por su creador, William A. J. Bailey, quien pese a haber abandonado los estudios universitarios se arrogaba el título de doctor. Anuncios como éste sacaban partido de la moda del radio, cuya eficacia antitumoral lo convirtió en prometedora panacea.

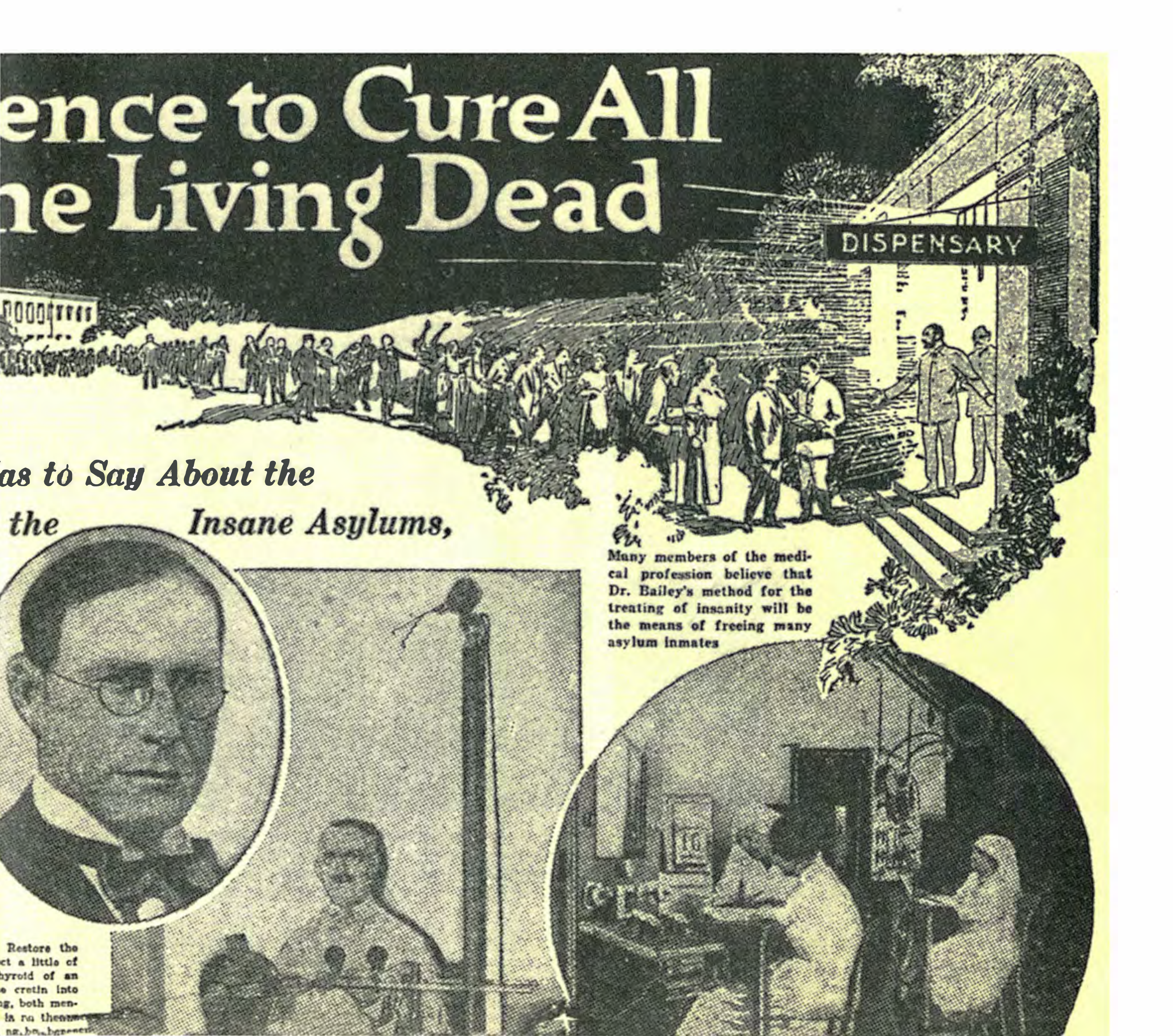
rayos X, quizá tres veces la dosis letal si la hubiera tomado de golpe.

La autopsia realizada al día siguiente de su muerte confirmó que sus huesos y órganos eran peligrosamente radiactivos. La mandíbula y los dientes que se le extrajeron, dejados a oscuras por una noche sobre una placa fotográfica, mostraron un revelado patético. Brigadas de funcionarios de la salud pública retiraron el peligroso material de los anaqueles de farmacias y droguerías. Quienes tenían medicinas radiactivas, empezaron, nerviosos y corridos, a entregarlas. Entre ellos, el mismo alcalde de Nueva York, James J. Walker, quien al principio se resistió a desprenderse de su revitalizador radiactivo porque, según decía, le entonaba.

Mi vinculación con el extraño caso de Eben Byers parte del otoño de 1989, cuando vi frascos vacíos de Radithor en una tienda de antigüedades médicas. Compré uno. Puesto que mi laboratorio se ocupa del tratamiento del cáncer mediante compuestos radiactivos de interés biológico, sé que, si se la "incuba" con radio, el agua se vuelve temporalmente radiactiva. El radio genera radón, un gas radiactivo de vida media corta. Supuse que el fabricante del fármaco había recurrido a este económico proceso y que la actividad residual del Radithor habría disminuido hasta niveles ínfimos.

Estaba equivocado. Las pruebas realizadas por John Humm y Marc R. Bellerive en nuestra unidad de espectroscopía de rayos gamma, en el Instituto Oncológico Dana Farber de Boston, mostraron que, unos 70 años después de haber sido puesta a la venta, el botellín casi vacío era todavía peligrosamente radiactivo. Calculamos que el frasco original contendría alrededor de un microcurio de radio 226 y otro de radio 228. Intrigado, compré la remesa entera. Cuando comprobé su radiactividad, acudí a la colección de libros curiosos de la Biblioteca Médica Countway y a la universitaria de Harvard para averiguar más acerca de la historia olvidada del Radithor, y de su inventor, el promotor de negocios varios y genio del mercado "Doctor" William J. A. Bailey.

Aunque contemporáneos, William Bailey y Eben Byers procedían de extremos opuestos del espectro social. Representaban la cara y la cruz del sueño americano durante las primeras décadas del siglo XX. Byers nació en 1880 a una vida privilegiada; asistió al Colegio St. Paul's y a la Universidad de Yale, donde sus finos modales y conquistas sociales en las escuelas de señoritas de la vecindad le valieron el sobrenombre de "el abuelito zorruno". Tras graduarse en 1901, hizo pinitos en los negocios, viajó, jugó al golf y se le debió en buena parte la victoria del equipo de golf de Harvard-Yale frente al equipo visitante de Oxford-



Cambridge en 1903. Al año siguiente entró en Hierros Girard, un empresa pequeña levantada por su padre, Alexander Byers. En 1909, tras la muerte de su hermano mayor, llegó a presidente de los altos hornos.

William John Aloysius Bailey nació en un barrio duro de Boston el 25 de mayo de 1884. Su padre, cocinero, murió siendo él muy niño. Dejaba nueve hijos que la madre, Mary, hubo de sacar adelante con unos míseros ingresos de 15 dólares semanales. Cursó la segunda enseñanza en el Instituto Quincy de Humanidades, para graduarse después, con el número doce de su clase, en la prestigiosa Escuela Pública de Latinidad de Boston, bien conocida como trampolín hacia la "Liga Ivy" (las prestigiosas universidades del nordeste de los Estados Unidos) para muchachos pobres con un buen expediente. Realizó un examen mediocre de ingreso en Harvard, pero se las arregló para entrar en el otoño de 1903. Las crecientes deudas le obligaron a abandonar la universidad dos años después, y aunque más tarde afirmara ser licenciado por Harvard y doctor por la de Viena, no existen pruebas que lo avalen.

Se trasladó a Nueva York, donde trabajó en un negocio de importación-exportación y editó un catálogo para la exportación. Sus cartas de esa época hablan con entusiasmo del proyecto de su vida: que le nombrasen agregado comercial de la embajada norteamericana ante el gobierno imperial de China. Nunca se materializaría. Durante los años que precedieron a la Primera Guerra Mundial, viajó sin parar y adquirió un barniz cosmopolita que luego le serviría de mucho. El estallido de la guerra le sorprendió en Rusia, donde perforaba pozos de petróleo, pero se volvió a casa en cuanto las circunstancias comenzaron a hacer inviable el comercio; se puso a trabajar en un taller mecánico.

Su nombre empezó a verse implicado en fraudes diversos. En su edición del 8 de mayo de 1915, el *New York Times* informaba que había sido arrestado por estafa, en una venta por correo, a Ingeniería Carnegie (empresa papelera sin vinculación con la acería del mismo nombre). Había aceptado por adelantado depósitos postales por valor de 600 dólares contra un vehículo que debía fabricarse en Michigan y entregarse en Pittsburgh. No había tal fábrica. Bailey, y dos más, fueron declarados culpables y condenados a 30 días de prisión.

En mayo de 1918 se le impuso una multa de 200 dólares, más las costas, por la promoción fraudulenta de "Las-I-Go, para una virilidad espléndida", medicamento que decía corregir la impotencia. El análisis químico de las píldoras demostró que el ingrediente activo era la estricnina.

Era natural que las investigaciones sobre la radiación le atrajesen; se había convertido ésta en un campo deslumbrante de la medicina. La novedad del fenómeno, su aprovechamiento en radiografías y su eficacia en la destrucción de tumores justificaron su mitificación. Los especialistas creían que había aplicaciones más sutiles



2. EBEN M. BYERS, atleta y mujeriego, tal y como era en la flor de su vida, varios años antes de que el consumo de Radithor provocara la destrucción de sus huesos y, en 1932, su muerte. El escándalo hizo que se retiraran de las farmacias los remedios radiactivos.



3. WILLIAM BAILEY había recorrido una historia agitada de negocios turbios antes de dar con la mina de oro del Radithor. Parece, sin embargo, que se creía su propia propaganda, y consumió durante años la medicina que él mismo había pergeñado.

por hallar. La propia Marie Curie —descubridora, con su marido Pierre, del radio en 1898— investigó en la posguerra los efectos de cantidades mínimas de radio en las células. En Inglaterra se denominó, a esa línea de trabajo, "terapia suave con radio" para diferenciarla del uso de dosis mucho mayores en el tratamiento del cáncer.

La radioterapia suave hundía sus raíces en las teorías homeopáticas y de la medicina física del siglo XIX, según las cuales la mayoría de los procesos de curación eran naturales y cantidades minúsculas de sustancias presentes en la naturaleza, complementadas con ejercicio y baños de sol, podían curar casi todas las enfermedades. Los abogados de esas tesis creían en los legendarios poderes curativos de las grandes fuentes termales europeas. Persistía un misterio, sin embargo. Las aguas parecían perder su virtud a los pocos días de ser embotelladas. En 1903 se descubrió que el agente aparentemente farmacológico disuelto en esas aguas era el radón. Tras las investigaciones de Ernest Rutherford sobre las emisiones de partículas alfa por parte del radio y del radón, los efectos curativos transitorios atribuidos a las aguas termales fueron adscritos a dichas partículas.

Se planteó la hipótesis de que las partículas alfa podían explicar la acción del sistema endocrino. La conexión no es tan extraña como pudiera parecer. El mundo médico se había entregado a la fascinación de ambos campos, y sobre uno y otro llovían los máximos honores. En 1921 Frederick Soddy recibió el premio Nobel de química por sus estudios sobre los radioisótopos; ese mismo año, Frederick Banting y Charles Best aislaron la insulina, trabajo por el que Banting y J. J. R. MacLeod ganaron en 1923 el Nobel de fisiología, o medicina. Aquel descubrimiento proporcionó un nuevo tipo de energía; éste, un método para controlar la transferencia de energía en el cuerpo —proceso por el cual el azúcar y otros alimentos básicos se transforman y adquieren formas más aprovechables por el organismo—. ¿No sería la radiactividad la chispa que ponía en movimiento la maquinaria biofísica?

George Wendt, en su conferencia en el XIII Congreso Internacional de Fisiólogos, comunicó que los leucocitos humanos expuestos a una radiación de bajo nivel emigraban hacia la fuente de radio y que las ratas moribundas por avitaminosis rejuvenecían transitoriamente cuando se las exponía a



4. ESTE ENVASE DE RADITHOR, adquirido en una tienda de curiosidades, seguía siendo peligrosamente radiactivo setenta años después de que su comprador original lo consumiese. El hallazgo ratifica al menos una de las afirmaciones de Bailey: era verdad que utilizaba radio y no un isótopo más barato de vida corta. El frasco contenía originalmente un microcurio de radio 226 y otro de radio 228.

ese elemento. Como las sustancias de las patrañas homeopáticas, parecía que el radio ejercía una doble acción médica, de sentido dispar: en grandes cantidades, destruía; sus trazas, en cambio, eran beneficiosas, y hasta pudiera ser que necesarias.

Las patrañas se transformaban en productos en menos tiempo del que hoy les costaría. La enteca jurisdicción de la Administración de Alimentación y Farmacología no abarcaba el radio, considerado un elemento natural, no un medicamento. Dulces, cremas, linimentos y jarabes radiactivos estaban ya ampliamente difundidos en 1915. Al principio, la moda parecía circunscribirse a Europa. En los Estados Unidos el interés por las propiedades medicinales y "catalíticas" del radio y sus productos de desintegración surgieron después de que la doblemente laureada con el Nobel Marie Curie realizara una gira en tren a lo largo del país en 1921.

No se sabe que Bailey viera a Madame Curie, pero es evidente que al principio de los años veinte se quedó extasiado con la radiactividad y sus efectos sobre la vida. Tradujo el *Traité de Radioactivité* que Curie había publicado en 1910. Creó en Nueva York la compañía Associated Radium Chemist, Inc., que sacó al mercado una línea de medicinas radiactivas: Dax para la tos, Clax para la gripe y Arium para los metabolismos débiles. Con anterioridad al asunto Byers, concluyeron estas actividades a iniciativa del Departamento de Agricultura; la publicidad fraudulenta fue el motivo.

No tardó en fundar otras dos nuevas empresas. La compañía Thorone (Torio-Hormona) producía panaceas que contenían radio y torio "para toda enfermedad glandular, metabólica o producida por deficiencias químicas", en especial para la impotencia. El Laboratorio Endocrino Americano fabricaba el Radioendocrinator, una especie de correaje de oro y plata que contenía radio y ceñía el cuello (para revitalizar el tiroides), tronco (para irradiar las cápsulas suprarenales o los ovarios) o, en provecho de los hombres exhaustos, el escroto, con un suspensorio especial. El artefacto salió a un precio de 1000 dólares, luego a 500 y finalmente a 150, según el mercado se fue saturando.

Bailey buscó la oportunidad de presentar sus teorías en foros científicos genuinos. En una operación de relaciones públicas, se hizo invitar para hablar en la sesión dedicada a los productos farmacéuticos del congreso de la Asociación Química Americana celebrado en Washington en 1924. "¡Hemos arrinconado en las glándulas endocrinas las taras, la enfermedad, la vejez y hasta la vida y la muerte!", proclamó, tonante. "En estas glándulas y en su entorno debemos centrar todo esfuerzo para la regeneración humana." Al día siguiente, el *New York Times* publicaba extractos de la conferencia en un artículo extenso y laudatorio.

En 1925 se trasladó a East Orange, Nueva Jersey, y abrió los Laboratorios Bailey de Radio. Allí creó y embotelló su obra maestra en el arte de la promoción comercial, el Radithor. Por ironía de las cosas, ese año señala también el comienzo del fin de la radioterapia suave. Varios químicos del radio de Nueva Jersey y diversas personas que pintaban esferas de reloj en la compañía U. S. Radium fallecieron tras un síndrome en el que se manifestaban una enfermedad renal, bajos recuentos sanguí-

neos y deterioro general de los huesos. Algunos especialistas atribuían la causa al envenenamiento por radio, pero él discrepaba. Consultado por el *New York Times* en calidad de experto, sentenció: "No hay prueba alguna de que el radio sea responsable de las muertes."

Su compañía distribuyó folletos de promoción entre todos los médicos colegiados del país, repletos de testimonios de pacientes y médicos, así como de fotografías que, se suponía, mostraban la extracción, purificación y análisis del radio en los Laboratorios Bailey. En realidad se limitaba a comprar, al por mayor, radio purificado del cercano Laboratorio Americano del Radio, lo embotellaba disuelto en agua destilada y le ponía precio con un margen de casi el 500 por cien. Ofrecía a los médicos un descuento del 17 por ciento como "honorario profesional", práctica que la Asociación Médica Americana condenó en 1927 como "reparto fraudulento de emolumentos".

Las campañas de promoción hicieron pronto de Bailey un hombre rico. Vendió más de 400.000 frascos de cuartillo entre 1925 y 1930. Comenzaron a llover pruebas de que bastaban pequeñas cantidades de material radiactivo para arruinar la salud, pero el público no quería darse por enterado. A nadie parecía importarle una enfermedad que sólo afectaba a mujeres pobres, de clase obrera, que pintaban con radio esferas de relojes. La Administración de Alimentos y Farmacología hizo advertencias públicas, pero no podía ejercer acciones legales. En consecuencia, fue la Comisión Federal de Comercio la que tomó la iniciativa de abrir una investigación en 1928 sobre las reclamaciones a Bailey. El 5 de febrero de 1930 ese organismo incoó un expediente oficial que le acusaba de falsedad en los anuncios que cantaban la eficacia e inocuidad de sus productos.

Fue por esas fechas cuando Eben Byers comenzó a padecer molestias y dolores desacostumbrados. Dijo a su médico de cabecera que había dejado de "sentirse en forma". Perdía peso y se quejaba de jaquecas y dolor de muelas. Le diagnosticaron un acceso de sinusitis, pero se alarmó cuando empezaron a caérsele los dientes.

Joseph Steiner, radiólogo neoyorquino, estudió las placas tomadas de Byers y apreció cierta semejanza entre el desarrollo de las lesiones óseas de su mandíbula y las descritas para las fallecidas en el caso de la pintura. Frederick B. Flinn, destacado experto en radio del departamento de medicina industrial de la Universidad de Columbia, fue llamado a consulta y confirmó las sospechas de Steiner: el cuerpo de Byers se descomponía poco a poco como resultado de una intoxicación generalizada con el radio contenido en el Radithor. Las conclusiones de Flinn, sin embargo, no se hicieron públicas, en parte porque otros expertos —incluido el médico personal de Byers— las rechazaron.

En septiembre de 1931 la investigación de la comisión estaba ya adelantada, y Byers fue llamado a declarar. Demasiado enfermo para viajar, Robert H. Winn fue enviado a su mansión de Long Island para tomarle declaración. Este abogado describiría más tarde la escena:

"Sería difícil imaginar una experiencia más espantosa en un escenario más espléndido. Fuimos a Southampton, donde Byers tenía una magnífica casa. Lo encontramos en un estado imposible de describir. De edad joven y con la mente despierta, apenas podía hablar. Tenía la cabeza envuelta en vendajes. Se había sometido a dos intervenciones consecutivas de mandíbula; le habían rebanado el maxilar superior entero, a excepción de dos dientes, y la mayor parte del inferior. Todo el tejido óseo que quedaba en su cuerpo se desintegraba lentamente, y se le estaban abriendo oquedades en el cráneo."

El 19 de diciembre de 1931 la comisión emitió una orden de suspensión por la que se obligaba a los Laboratorios Bailey de Radio a que dejaran de comercializar el Radithor. La decisión fue demasiado tardía para que beneficiara a Byers. A su muerte, en 1932, la comisión reabrió la investigación, y la Administración de Alimentos y Farmacología inició una campaña para ampliar sus competen-



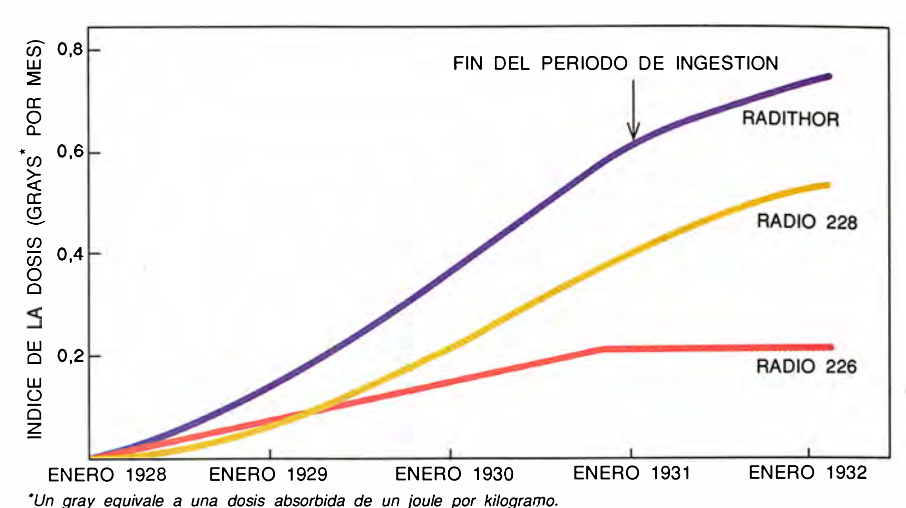
5. LOS RAYOS INVISIBLES de los dientes de Byers dejaron estas fantasmales imágenes en la película fotográfica durante el examen forense que siguió a su espantosa muerte. Décadas después, un nuevo examen de los dientes y huesos de Byers, Bailey y otros consumidores de Radithor descubrió todavía niveles altos de radiactividad residual. Aunque muchos afectados sucumbieron pronto, otros —como el propio Bailey— alcanzaron edades considerables, a menudo sin sufrir ninguna afección que pudiera atribuirse claramente a la radiación. Se desconoce el motivo de tan extraordinaria variabilidad en los efectos a largo plazo de la radiación.

cias. Las sociedades médicas aprovecharon la oportunidad para denunciar la venta de toda medicina con fórmulas secretas o explotadas en exclusiva por una firma. Se alzaron voces reclamando también leyes para el control del radio. Los precedentes de las regulaciones actuales que permiten la venta de fármacos radiactivos sólo a usuarios autorizados se remontan al asunto Byers. Con la promulgación de estas normas, la industria de los fármacos radiactivos se desplomó de la noche a la mañana.

Bailey nunca fue procesado por la muerte de Byers, y mantuvo que todo se reducía a un diagnóstico equivocado. Afirmaba: "He bebido yo más agua de radio que ningún hombre vivo y nunca he padecido el menor daño." La Comisión Federal de Comercio le puso oficialmente la losa a su Radithor a finales de 1932; mas, para entonces, la Gran Depresión había pasado factura a las ventas del brebaje, y Bailey andaba ya produciendo nuevos fetiches radiactivos: el Bioray, pisapapeles radiactivo que, decían los anuncios, era "un sol en miniatura"; el Adrenoray, una hebilla de cinturón radiactiva; y el Thoronator, "manantial de salud para toda casa u oficina", radiactivo y rellenable.

Acosado por la prensa y los funcionarios de la salud pública de Newark, abandonó la ciudad por los días en que el escándalo Byers alcanzaba su apogeo. Los periodistas acabaron por descubrir su escondite, en la sede de Adrenoray. Cuando se le preguntó qué tipo de negocio dirigía allí, respondió que era una "agencia de publicidad especial" y que el rótulo de la puerta "no significaba nada".

Desapareció de la vista del público. Se convirtió en editor del *Bloomfield Times* de Nueva Jersey y escribió libros sobre política internacional y salud. Durante la II Guerra Mundial fue observador aéreo en el primer Comando de Cazas. Ideó también un método para enseñar a nadar a los soldados, aparatos para la detección de submarinos y un mecanismo para calibrar el punto de mira de las armas. Quizá fuese también director en tiempo de guerra de una pequeña división electrónica de la IBM. Murió el 16 de mayo de 1949 en Tyngsborough, Massachusetts, a los 64 años. Aunque falleció de un cáncer de vejiga, nunca aceptó que la radiactividad en pequeñas dosis fuera peligrosa, y casi hasta el final sostuvo que su salud y su ánimo eran excelentes. "He desarrollado", escribió, "una filosofía de la vida que no admite antipatía a nada". Los registros de impuestos de Tyngsborough cifraron el valor total del patrimonio de la familia Bailey en el momento del fallecimiento en 4175 dólares.



*Un gray equivale a una dosis absorbida de un joule por kilogramo.

6. RADIACTIVIDAD DEL ESQUELETO de Byers. El gráfico se basa en estimaciones de la potencia del Radithor y de la cantidad consumida. Debido a que algunos productos de desintegración son más radiactivos que el propio radio del que proceden, el índice de la dosis siguió aumentando incluso después de que Byers dejara de tomar la medicina.

Esta historia tiene una curiosa coda. Poco después de iniciar mi investigación sobre Bailey por las bibliotecas, me di cuenta de que iba pisando las huellas de un gigante. Desde los años treinta, Robley D. Evans, director emérito del centro de radiactividad del Instituto de Tecnología de Massachusetts, había investigado cierto número de envenenamientos por Radithor dentro de un trabajo general sobre las enfermedades que afectaban a los químicos del radio y a las pintoras de relojes. Evans y su equipo del MIT y del Laboratorio Nacional de Argonne estudiaron a 29 pacientes (21 vivos y ocho postmortem); encontraron amplias variaciones en la distribución de la radiactividad inducida en los huesos y en las consecuencias que de ello resultaban para la salud.

Los datos sugieren que algunos individuos pueden tolerar altas cantidades de radioisótopos —el radio entre ellos— que se fijan en los huesos. Quizás esas personas excreten muy bien tales sustancias o produzcan hormonas protectoras (tales como el factor estimulante de las colonias de granulocitos y las interleucinas) que estimulan el crecimiento de hematocitos cuando el cuerpo se expone a la radiación. Entre esos consumidores afortunados del Radithor se contaba el propio Bailey.

Entre el material que Evans y sus colegas estudiaron en los años sesenta estaban los restos desenterrados de dos consumidores del Radithor cuyas historias clínicas se corresponden tan estrechamente con las de Eben Byers y William Bailey que constituyen una identificación positiva. Los huesos de ambos hombres mostraban graves alteraciones debidas a la radiación, y todavía eran peligrosamente radiactivos.

El estudio de los efectos a largo plazo de la radiación alfa continúa. Desde mi primera publicación de esta investigación, otras víctimas del envenenamiento medicinal por radio se han puesto en contacto conmigo. Aunque la moda de las medicinas radiactivas pasó hace mucho, algunos de los datos que han legado ayudarán a resolver los problemas que en las casas plantea el radón y en el ambiente los residuos nucleares, así como a evaluar los costos y beneficios de la terapia con radiación alfa en oncología. Porque, como dijo Bailey, quizá con presciencia involuntaria y un mucho de ironía: "La radiactividad es uno de los agentes más notables de la ciencia médica. Los descubrimientos relativos a su acción sobre el cuerpo han llegado tan lejos que es imposible vaticinar los desarrollos futuros. Es *la luz perpetua*."

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

RADIOACTIVITY AND HEALTH: A HISTORY. J. Newell Stannard. National Technical Information Service, 1988.

RADITHOR AND THE ERA OF MILD RADIUM THERAPY. Roger M. Macklis, en *Journal of the American Medical Association*, vol. 264, n.º 5, páginas 614-618; 1 de agosto de 1990.

Evaporitas

Estas formaciones rocosas no limitan su interés al beneficio económico que han reportado al hombre durante siglos, sino que podrían resolverle uno de sus principales problemas, el del almacenamiento de los residuos nucleares

C. Ayora, C. de las Cuevas, J. García Veigas, L. Miralles, J. J. Pueyo y P. Teixidor

Aproximadamente el 3 por ciento de las rocas sedimentarias presentes en la corteza terrestre están constituidas por evaporitas, es decir, por asociaciones de minerales formados a partir de salmueras sometidas a evaporación. Se conocen unos 200 minerales evaporíticos; entre ellos, cloruros, sulfatos, boratos y carbonatos. Los más abundantes son la halita (NaCl), el yeso ($CaSO_4.2H_2O$) y la anhidrita ($CaSO_4$). Los minerales evaporíticos precipitan cuando las concentraciones de solutos en la salmuera rebasan sus respectivos productos de solubilidad.

Las salmueras son soluciones iónicas naturales altamente concentradas y de origen muy dispar. Principalmente se forman por evaporación de agua marina (con una concentración salina de 35 gramos por litro y composición más o menos constante) o por evaporación de aguas continentales (con concentraciones y composiciones variables que dependen de la naturaleza del terreno en el área de drenaje). También pueden generarse por redisolución de evaporitas preexistentes o por procesos de interacción entre el agua y las formaciones rocosas.

La evaporación constituye, sin embargo, el proceso más eficaz de formación y concentración de salmueras. Ello nos indica que la aridez climática será un factor necesario en la génesis de las evaporitas. Pero, por sí sola, no basta la aridez. Se precisa también el llamado factor de restricción, o grado de aislamiento de la salmuera original, que evita su nueva dilución. Sin restricción nunca llegaría a formarse una masa de salmuera adecuada para que, a partir de ella, cristalicen minerales evaporíticos.

CARLOS AYORA, CARLES DE LAS CUEVAS, JAVIER GARCIA VEIGAS, LOURDES MIRALLES, JUAN JOSE PUEYO y PILAR TEIXIDOR trabajan en el origen e interés de las evaporitas desde enfoques complementarios. Ayora es investigador del Instituto de Ciencias de la Tierra de Barcelona (CSIC). De las Cuevas, García Veigas, Miralles y Teixidor colaboran en un proyecto sobre almacenamiento de residuos radiactivos en formaciones salinas establecido entre la Universidad de Barcelona y la Empresa Nacional de Residuos Radiactivos (ENRESA), y Pueyo, profesor de geoquímica en la Universidad de Barcelona, dirige el proyecto mencionado.

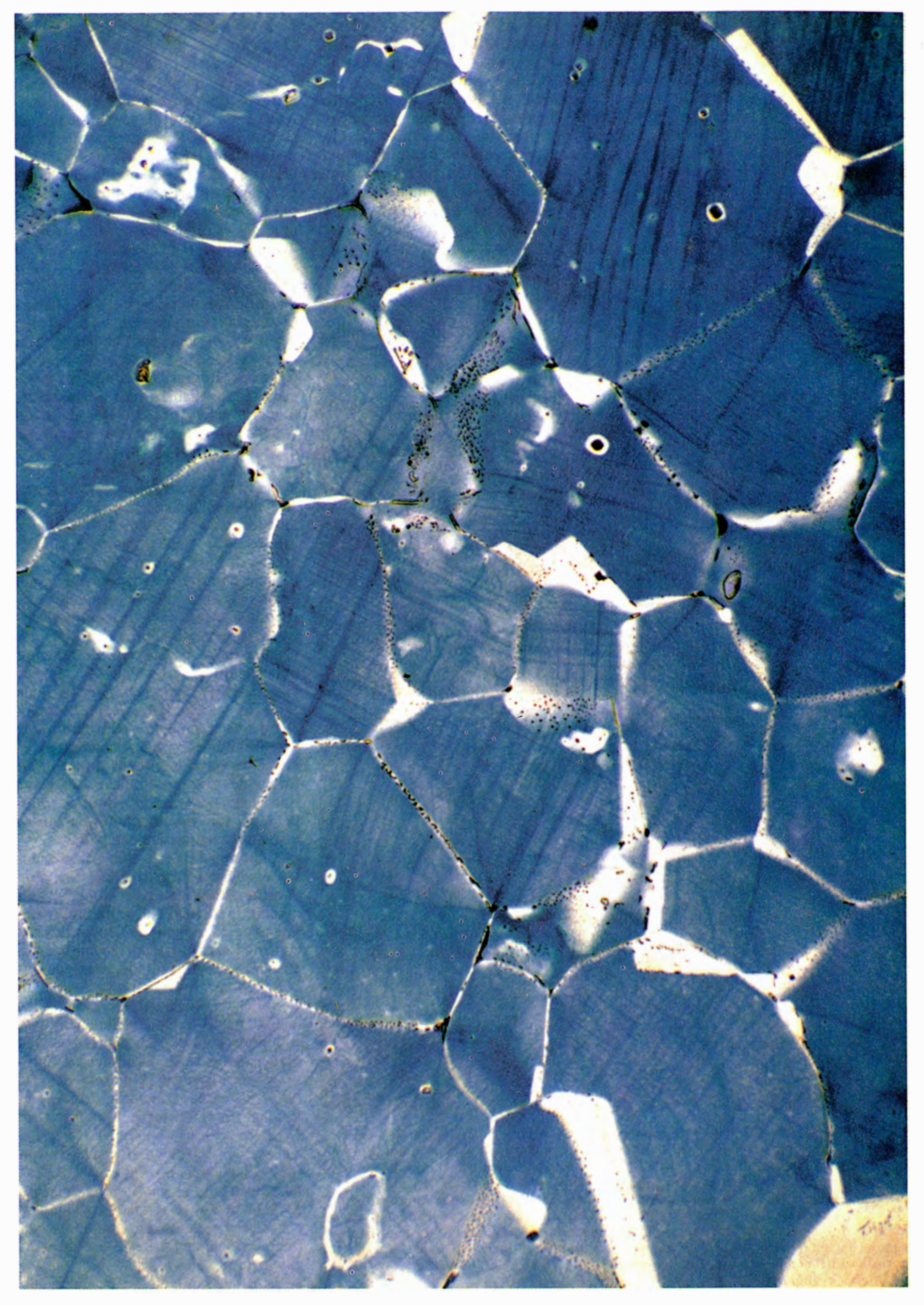
Consideremos, por ejemplo, la superficie del mar frente a la costa pacífica americana, en la zona tropical árida. Se registra allí una fuerte evaporación. Sin embargo, nunca llegarán a precipitar minerales evaporíticos por causa de la misma, ya que el océano es un sistema abierto, sometido a un proceso de constante homogeneización debido a las corrientes marinas. Para que puedan formarse evaporitas se requiere un dispositivo que aísle la salmuera y permita su concentración progresiva. Dicho dispositivo tiene que posibilitar la entrada continua de agua marina que compense el agua perdida por evaporación. La laguna costera Ojo de Liebre, situada en la Baja California mexicana, y la Bocana de Virrila en Perú son dos ejemplos que caracterizan el fenómeno.

Los anteriores ejemplos de formación de evaporitas marinas actuales explican los mecanismos del proceso, pero no las dimensiones de las grandes cuencas salinas desarrolladas en el pasado geológico, como pudieran ser las de la cuenca del Zechstein norte-europeo, la cuenca devónica canadiense de Elk Point, la cuenca del Keuper europeo y la cuenca del Messiniense mediterráneo, de las que no hay equivalentes funcionales.

El momento geológico actual, en período postglacial, no es adecuado para el desarrollo de grandes cuencas evaporíticas marinas. Por dos razones principales. En primer lugar, el nivel de los océanos, relativamente alto y con tendencia general ascendente a causa de la progresiva disminución de la masa de hielos continentales polares. Los períodos idóneos para la generación de cuencas evaporíticas marinas de grandes dimensiones han sido, de preferencia, regresivos. En efecto, cuando baja el nivel oceánico, crece la probabilidad de que los mares (o brazos de mar) marginales queden separados (o restringidos) del océano global. La segunda razón tiene que ver con la herencia topográfica de la reciente orogenia alpina, que implica la existencia de relieves bastante abruptos, con pocos mares epicontinentales. Estos mares, cuando quedan restringidos, facilitan la formación de grandes cuencas evaporíticas ("gigantes salinos").

El Mediterráneo actual es un mar algo restringido, conectado con el Atlántico sólo a través del estrecho de Gibraltar. El balance hídrico de la cuenca (entradas de agua de procedencia atlántica y entradas de agua de río, menos salidas de agua hacia el Atlántico y pérdidas de agua por evaporación) determi-

1. HALITA AZUL. La halita o sal común es uno de los minerales evaporíticos más abundantes. Lo mismo que otros haluros, la halita se colorea cuando se somete a radiaciones ionizantes (rayos X, rayos gamma). En el caso de la fotografía el color azulado es debido a la formación de sodio metálico que se distribuye en forma de partículas de tamaño coloidal. La intensidad de la coloración depende de la cantidad de radiación absorbida. Las zonas blancas, generalmente asociadas a bordes de grano o a inclusiones líquidas, corresponden a halita recristalizada posteriormente a la irradiación. Los granos de halita de la fotografía tienen un tamaño medio de 0,5 milímetros.



na que su salinidad actual en superficie sea de 38 gramos por litro, esto es, aproximadamente un 3 por mil más elevada que la salinidad oceánica. Las causas de ello vienen definidas por la interacción de los factores de aridez y restricción, antes mencionados.

Dada su latitud, la cuenca mediterránea presenta la aridez adecuada para generar evaporitas, pero no está suficientemente restringida. Sí lo estuvo durante el período Messiniense (hace 5,5 millones de años), cuando se formaron salmueras cuya concentración posibilitó la precipitación incluso de sales potásico-magnésicas, altamente solubles. Las evaporitas messinienses tienen una disposición concéntrica: las sales más insolubles y primeras en precipitar, como el yeso, lo hicieron preferentemente en la periferia de la cuenca, mientras que las más solubles (halita y sales potásicas) se situaron en sus partes centrales (principalmente bajo el actual fondo del mar Mediterráneo).





2. SALAR DEL RINCON, en la Puna argentina. Con una superficie de 260 kilómetros cuadrados, puede considerarse un salar de tamaño medio. Está emplazado en una fosa tectónica de dirección N-S. Hacia el sur, la cuenca está limitada por tres conos volcánicos coalescentes alineados (el volcán Pocito es visible en ambas fotografías). Hacia el norte, la depresión queda cerrada por depósitos ignimbríticos y abanicos aluviales. La fotografía superior muestra un aspecto panorámico, aunque parcial, de la parte sur del salar. En la fotografía inferior es visible la superficie rugosa del salar bajo la que hay un cuerpo salino de al menos 40 m de espesor. La porosidad del sedimento está llena por una salmuera rica en boro, litio y otros iones de interés económico.

La formación de evaporitas también se da en medios continentales, siempre que existan las condiciones necesarias de aridez y restricción. Ocurre así en los sistemas lacustres endorreicos de zonas áridas y semiáridas. Cuando la entrada de aguas continentales (ríos, fuentes termales, cursos subterráneos) se compensa con las salidas por infiltración y evaporación, el balance hídrico de la cuenca lacustre se aproxima a cero y el lago salino podrá tener una masa de salmuera estable. Si la fuerte evaporación determina un balance negativo, el lago evolucionará hacia modelos de tipo playa o tipo salar. En estos últimos, la salmuera se encuentra, de manera casi permanente, a cierta profundidad bajo el fondo seco del lago, rellenando la porosidad del sedimento.

Las cuencas endorreicas intramontañosas constituyen los lugares idóneos para el desarrollo de lagos salinos, que suelen aparecer en depresiones de origen tectónico sin drenaje exterior. La restricción a que aludíamos antes viene condicionada, en estos casos, por razones morfológicas y estructurales. La aridez depende de la latitud (factor siempre importante) y del efecto de sombra pluviométrica generado por los altos relieves circundantes, que actúan como una trampa fría para las masas de aire húmedo, pues condensan el vapor de agua que queda atrapado en forma de nieve o lluvia en el exterior de la cuenca. En virtud de ello, la depresión intramontañosa muestra una aridez anómalamente alta.

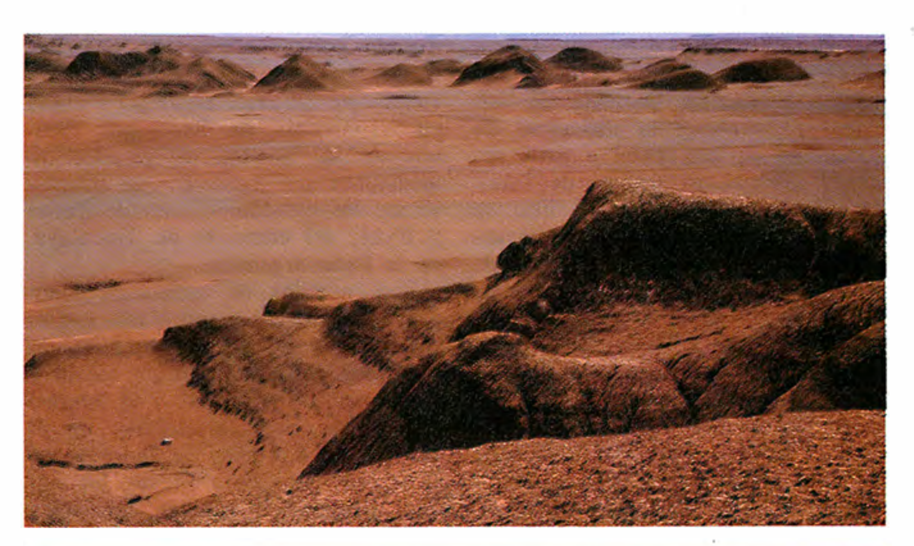
A diferencia de lo que sucede con las evaporitas marinas, los ejemplos continentales actuales abundan en número y diversidad y permiten desentrañar el origen de las evaporitas continentales fósiles. Ejemplos de cuencas continentales actuales son las depresiones intramontañosas de la Cordillera Californiana (Estados Unidos) y del Altiplano andino (Bolivia, Argentina y Chile), las sebjas y chotts nord-saharianos (de Marruecos a Egipto) y los lagos de la meseta del Tibet. Cuencas continentales fósiles son las que dieron lugar a los Yesos de Zaragoza (de edad miocena) y a los Yesos de Barbastro-Puentelarreina (de edad eoceno-oligocena), a los megacuerpos salinos neógenos de Arizaro y Pastos Grandes (Puna argentina) y a la Cordillera de la Sal (margen occidental del Salar de Atacama, norte de Chile).

Ya desde antiguo se ha intentado

construir modelos que expliquen el comportamiento de las cuencas salinas, marinas y continentales, y den cuenta de las secuencias minerales observadas en las series evaporíticas fósiles. Se empezó por idear experimentos de evaporación a escala de laboratorio, en condiciones controladas de temperatura y tasa de evaporación, utilizando agua de diversas procedencias. Conviene recordar a este propósito los trabajos del químico italiano Usiglio, a mediados del siglo pasado, y los de los alemanes J. H. Van t'Hoff, D'Ans y Jänecke y del ruso Valyashko, en el presente siglo. Gracias a tales estudios se llegó a conocer el comportamiento básico de los sistemas evaporíticos; aportaron, además, datos fisicoquímicos que sólo podían ser determinados experimentalmente.

A lo largo de la última década, varios grupos de investigación norteamericanos han simulado el proceso de evaporación-precipitación mediante ordenador, aprovechando el desarrollo de programas de cálculo del comportamiento termodinámico de soluciones altamente concentradas (modelo de interacción iónica de Pitzer). Charles Harvie y John Weare, de la Universidad de California en San Diego, trabajaron en las condiciones de equilibrio mineral-salmuera. Hans Eugster, de la Universidad Johns Hopkins, y Ronald Spencer, de la de Calgary, avanzaron en el terreno de la modelización de secuencias de precipitación a partir de agua marina o de mezclas de ésta con otras de diversa procedencia (río y fuentes termales).

En 1992, nuestro grupo desarrolló un programa que simula la evaporación y las entradas y salidas de agua y iones en solución en la cuenca. Nos fundamos en el modelo conceptual de una cuenca evaporítica hidrológicamente abierta propuesto por Ward Sanford y Warren Wood, del Servicio Geológico de los Estados Unidos en Reston. Nuestro programa, aplicable a las cuencas marinas y a las continentales, proporciona, en todo momento, datos relativos a la evolución composicional de la salmuera, así como sobre los minerales que precipitan y la cantidad en que lo hacen.





3. MEGACUERPO SALINO DE ARIZARO, situado al E del salar del mismo nombre, en la Puna argentina; con una potencia de unos 500 metros, la extensión del mismo se estima en unos 40 kilómetros, en dirección N-S. Se dispone como un conjunto de bloques basculados de forma caótica (*fotografía superior*) y constituidos por materiales de un paleosalar de edad neógena que ha sido exhumado por la tectónica. En la fotografía inferior, que muestra el detalle de uno de dichos bloques, puede apreciarse que la sal se presenta mezclada con abundante material arcilloso.

Por su propia naturaleza, los procesos evaporíticos promueven la concentración de sales muy solubles, la mayoría de las cuales reviste interés económico.

Los sistemas evaporíticos actuales permiten el beneficio de los minerales que precipitan con periodicidad estacional. Citemos, además de la halita, carbonatos sódicos (natrón, trona y termonatrita), en los lagos alcalinos; sulfatos sódicos (mirabilita y thenardita) y sulfatos magnésicos (hexahidrita y epsomita) en los lagos sulfatados, y boratos (bórax y ulexita) en lagos con fuerte influencia de manantiales termales.

En las salinas artificiales se explotan sales en régimen de cosecha. Se parte de agua marina o de manantial (según se trate de salinas marítimas o continentales), produciéndose la evaporación en balsas someras. En las salinas marítimas suele beneficiarse cloruro sódico, o sal común. Consisten en un circuito de gran longitud compartimentado en balsas, donde se introduce agua marina por un extremo. A lo largo del circuito se genera un gradiente de salinidad en el que van precipitando, de manera secuencial, carbonato cálcico, yeso y halita. Aunque la configuración de los circuitos de la salina varía, la disposición clásica dibuja una espiral centrípeta. Las salmueras más concentradas quedan así protegidas de la dilución en la zona central del dispositivo, en donde se sitúan los cristalizadores.

En algunos sistemas evaporíticos actuales se explotan directamente sus salmueras cuando éstas contienen elementos de especial interés, por ejemplo, potasio, boro y litio. En las salmueras del Salar de Atacama, saturadas en cloruro sódico, se acumula litio en concentraciones económi-

cas de 1400 ppm. La rentabilidad de su explotación es manifiesta, considerado el enorme cubicaje de salmuera existente y la dificultad de extracción de ese metal a partir de menas alternativas (micas de litio). La presencia de boro y de litio en las salmueras de muchos salares andinos se atribuye a la lixiviación de los materiales volcánicos adyacentes al salar, causada por la circulación de agua termal en células convectivas, cuyas surgencias (en forma de manantiales termales o géyseres) vierten en los lagos. Investigadores argentinos de la Universidad Nacional de Salta trabajan, desde hace algún tiempo, en proyectos de evaluación, mediante sondeo, de la potencialidad económica de las salmueras existentes en algunos salares de la Puna argentina.

El interés extractivo de las evaporitas fósiles radica en su contenido mineral. La halita, el yeso y la anhidrita se emplean en la industria (química, textil y alimentaria), en metalurgia y en la construcción. La importancia de sus yacimientos depende, pues, de su localización y de su pureza. Las evaporitas de origen marino pueden ser mena de sales potásicas (silvita y carnalita); las continentales, de carbonatos sódicos, sulfatos magnésicos (epsomita), sulfatos sódicos (thenardita y glauberita) y boratos (bórax y colemanita). Ejemplos de yacimientos potásicos son los de Elk Point (Canadá), los de la cuenca pérmica germano-polaca y los de la cuenca eocena surpirenaica española. Entre los yacimientos de sulfato sódico se conocen, desde antiguo, los miocenos de la cuenca de Madrid, explotados ahora en Villarrubia de Santiago. Yacimientos de boratos de grandes dimensiones son los turcos de Emet y Kirka, los estadounidenses de Boron y Ryan, así como el de Tincalayu, en la Puna argentina.

Los métodos de extracción habituales en rocas evaporíticas fósiles son la explotación en cantera, si nos referimos a los sulfatos de calcio y yacimientos de boratos, y el laboreo subterráneo o la disolución, en el caso de los cloruros. De acuerdo con el espesor del recubrimiento, los sulfatos de sodio fósiles se benefician por laboreo subterráneo o por disolución en superficie.

Por su estabilidad geomecánica, las formaciones evaporíticas de halita que se hallen entre 500 y 1000 metros de profundidad pueden, además, convertirse en óptimos almacenes subterráneos de reservas estratégicas de hidrocarburos o en repositorios de residuos radiactivos. Los materiales salinos se comportan plásticamente, siendo autosellantes y, por tanto, muy impermeables a los fluidos. Los almacenamientos subterráneos de hidrocarburos (líquidos o gaseosos) resultan menos caros y dañan menos el entorno que los superficiales; además son menos peligrosos debido al aislamiento absoluto de posibles comburentes.

La técnica de construcción de las cavidades para el almacenamiento subterráneo (de decenas a centenares de metros de diámetro) se basa en la disolución controlada desde la superficie, a través de sondeos. La sal debe tener un contenido en insolubles (arcillas y sulfatos) inferior al 20 por ciento, para evitar la excesiva acumulación de residuos que entorpece el proceso de disolución. Los hidrocarburos gaseosos (gas natural), almacenados a sobrepresión (por encima de los 100 bars), fluyen espontáneamente de la cavidad. Los combustibles líquidos (crudos, o productos ya refinados, como gasóleo, o propano y butano licuados) han de extraerse bombeando salmuera saturada con sal, hacia el interior de la cavidad. Cuando se bombea combustible hacia la misma, éste desplaza la salmuera volumen a volumen a través de un sistema de vasos comunicantes.

El mismo principio explica el interés que encierran las formaciones salinas fósiles para enterrar residuos radiactivos. Al carácter impermeable y autosellante de la sal común hemos de sumar su estabilidad y conductividad térmica, altas, y la relativa facilidad de laboreo del macizo rocoso salino. Ello permite la construcción de dispositivos que garanticen el aislamiento de los residuos durante un período de tiempo lo suficientemente largo como para que los radionúclidos que contienen rebajen su radiactividad hasta niveles tolerables. Los residuos radiactivos pueden presentar una actividad gamma baja, media o alta. En los casos de baja y media actividad bastará con garantizar el aislamiento del sistema por un período de 300 años, debido a que la vida media de sus radionúclidos no es superior a 30 años. El combustible nuclear "quemado" en los reactores de las centrales posee una actividad gamma alta; se trata de residuos que contienen los productos de fisión, transuránidos producidos por captura neutrónica del uranio, así como sus productos de desintegración radiactiva, con períodos de semidesintegración de hasta 24.000 años. En este caso, debe garantizarse la integridad del almacenamiento durante un período de unos 100.000 años, tiempo suficiente para que haya perdido buena parte de su radiactividad.

La rotura de estanqueidad del almacenamiento implicaría la entrada de agua en el mismo causando, sucesivamente, la lixiviación de los residuos, el transporte de los radionúclidos a través de la geosfera y, si existe conexión hidráulica con los acuíferos superficiales, la introducción de los radionúclidos en la biosfera a través



4. EXTRACCION EN SALINAS GRANDES en la Puna argentina, mediante un sistema primitivo que recurre a los animales de carga. La sal ha sido cortada en bloques en la misma superficie del salar, y apilada para su posterior transporte. En los bloques se observa la alternancia de halita (*blanca*) y componentes detríticos (*oscuros*).

de ríos y lagos. De ahí la importancia de garantizar tiempos de estanqueidad que aseguren la merma de radiactividad y, por ende, del riesgo para la naturaleza viva.

Las formaciones salinas cumplen, en principio, las condiciones necesarias, aunque deben considerarse otros factores complementarios. Si nos ceñimos a los aspectos técnicos, convendrá hacer hincapié en su espesor, situación geológica (zonas de estabilidad tectónica), homogeneidad y bajo contenido en impurezas, fluidos intersticiales y su respuesta frente al incremento térmico y a la radiación. Nuestro grupo trabaja ahora en la caracterización del macizo salino, con especial atención a la determinación y cuantificación de fluidos intersticiales, y al análisis del comportamiento de la sal cuando es expuesta a radiaciones gamma.

La sal común fósil contiene siempre pequeñas cantidades de salmuera (normalmente inferiores al 1 por ciento en peso), que se halla en los bordes de los granos de la roca salina o atrapada en inclusiones, dentro de los cristales de halita. El fluido que rellena las inclusiones intracristalinas es, en la mayoría de los casos, vestigio de la salmuera primaria de la cuenca, a partir de la cual precipitó la halita. Estas salmueras originales pueden perdurar indefinidamente, siempre que los procesos que ha sufrido la sal subsiguientes a su sedimentación no sean importantes. Además de la primaria, hay otro tipo de salmuera situada en los bordes de grano de la halita, cuya composición es la de los fluidos que circularon por el macizo salino después de la sedimentación. Componen esos fluidos las salmueras primarias, movilizadas durante la compactación del sedimento salino, las salmueras originadas por transformaciones minerales debidas a incremento de temperatura y las salmueras de procedencia externa.

Es importante conocer la cuantía y tipos de agua existentes en las formaciones salinas a la hora de abordar el emplazamiento de los residuos radiactivos. Los residuos almacenados pueden, en virtud de la propia desintegración radiactiva, alcanzar temperaturas altas dentro de los bidones: entre 200 y 400 grados Celsius. Debido al gradiente de temperatura, las salmueras atrapadas dentro de los granos de sal migrarán hacia los bordes de grano. Desde allí, y por difusión térmica, proseguirán emigrando hacia el foco de calor, es decir, hacia el emplazamiento de los residuos, lo que puede acarrear problemas de corrosión. Además de las inclusiones fluidas, los minerales hidratados que suelen acompañar a la halita son también fuentes potenciales de agua en las formaciones salinas elegidas para almacenamiento de residuos.

Para conocer la composición exacta de las salmueras atrapadas en la sal hemos utilizado un microscopio electrónico de barrido dotado de un analizador por dispersión de energías, al que se ha adaptado un dispositivo criogénico. El montaje permite microanalizar, con precisión aceptable, inclusiones líquidas con tamaños de hasta 20 micrometros, previa congelación a temperatura de nitrógeno líquido.

Las formaciones salinas contienen, también, cantidades variables de dió-





5. SALINAS ARTIFICIALES COSTERAS. Constan de circuitos de balsas a lo largo de los que se produce un gradiente de salinidad debido a la evaporación. A partir de agua marina, se consiguen salmueras de más de 300 gramos por litro, ricas en cloruro sódico y fuertemente empobrecidas en iones de calcio, por precipitación de yeso. Las salmueras se vierten en unas balsas especiales, los cristalizadores, donde precipita la sal. Este proceso se prolonga hasta cerca del comienzo de la precipitación de la epsomita, momento en el que se interrumpe, añadiendo más salmuera o desaguando la balsa cuando está ya llena de sal. La producción de una salina grande de la costa mediterránea española oscila entre 10^5 y 10^6 toneladas al año. La fotografía superior muestra un aspecto general de las balsas de las salinas de Bras del Port (Santa Pola, Alicante). Las de tonalidad más clara corresponden a los cristalizadores en los que se recolecta la sal. La fotografía inferior muestra un detalle de la recolección de la cosecha de sal.

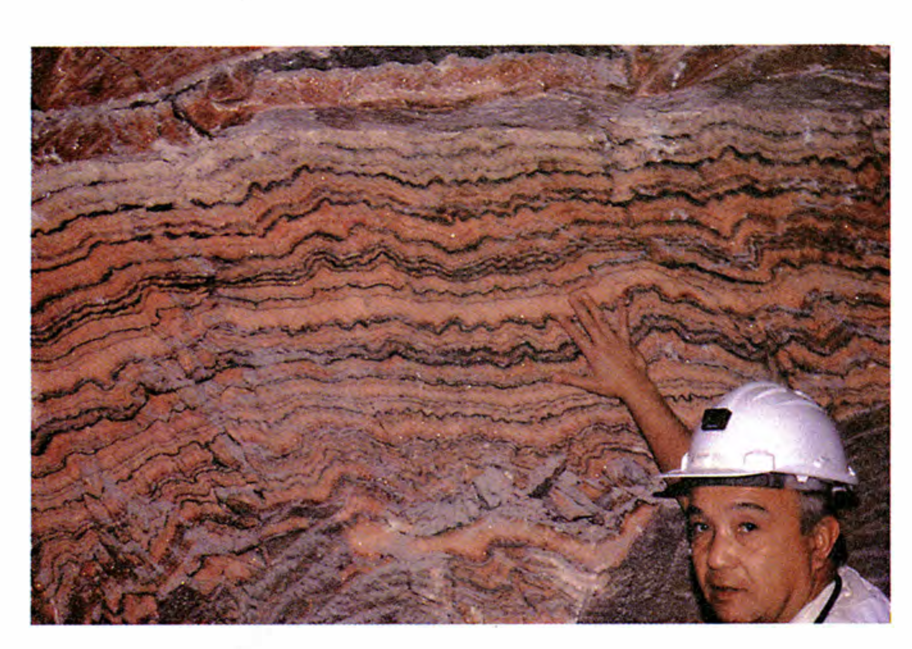
xido de carbono, metano, oxígeno, nitrógeno, argón, sulfuro de hidrógeno, monóxido de carbono e hidrógeno, de diversa procedencia. Además de estos gases, de origen natural, aparecerán otros de origen térmico, radiolítico y resultantes de la corrosión de los contenedores de los residuos. La materia orgánica, siempre presente en pequeñas cantidades en la sal, constituye una fuente potencial de gas (metano) cuando se la somete a un incremento de temperatura. Otras fuentes potenciales de gas son: la interacción de la radiación gamma con el agua intersticial (que libera hidrógeno) y con la sal común (que libera cloro); la corrosión de los contenedores metálicos por la salmuera intersticial (con liberación de hidrógeno) y el potencial escape de gases radiactivos procedentes del propio residuo (^{85}Kr, ^{3}H, $^{14}CO_2$, $^{129}I_2$ [este último gaseoso por encima de 200°C]). La aparición de gases provoca riesgos a corto plazo, es decir, durante la fase operacional del repositorio (formación de gases inflamables y tóxicos), y a largo plazo, cuando ha sido ya sellado (generación de ambientes corrosivos y de sobrepresión).

Nuestro grupo ha realizado estudios en el campo de la cuantificación de los gases y de la materia orgánica presentes en las rocas salinas, así como sobre la capacidad de esta última de generar gases térmicos y radiolíticos.

La roca salina que rodea a los contenedores se altera si recibe fuertes dosis de radiación gamma durante un período de tiempo prolongado. La energía de la radiación emitida por los residuos será absorbida por la roca en función inversa del cuadrado de la distancia al foco de radiación. Dicha energía se acumula en la red cristalina del cloruro sódico en forma de defectos y de partículas de sodio metálico de tamaño coloidal (entre 1 y 100 nanómetros) producidas por radiolisis del NaCl.

Dos de los autores del artículo han trabajado en la cuantificación de defectos cristalinos y de sodio coloidal generados en muestras irradiadas con dosis de hasta 48 MGy, y tasas de dosis de hasta 15 KGy/hora, de rayos gamma. Si bien la energía acumulada por la roca salina puede medirse globalmente mediante técnicas calorimétricas, la cuantificación de defectos cristalinos y de coloides metálicos requiere métodos más específicos. Nosotros hemos optado por medir el espectro de absorción en el intervalo visible-infrarrojo cercano (entre 300 y 900 nanómetros) sobre una lámina delgada de sal irradiada de 50 a 100 micrometros de espesor. En el espectro aparecen conjuntamente bandas de absorción correspondientes a centros F y coloides. La relación entre el coeficiente de absorción y la densidad de defectos puntuales y concentración de coloides permite su cuantificación.

El avance metodológico que ha supuesto el desarrollo de técnicas analíticas de alta definición en el estudio de las formaciones salinas como potenciales repositorios radiactivos, aparte del interés que presenta para dicho fin, resulta de gran utilidad en la reconstrucción de procesos geológicos. Si se aplican las técnicas de análisis puntual al estudio de inclusiones líquidas y se combinan los resultados con la simulación de evaporación de salmueras mediante orde-





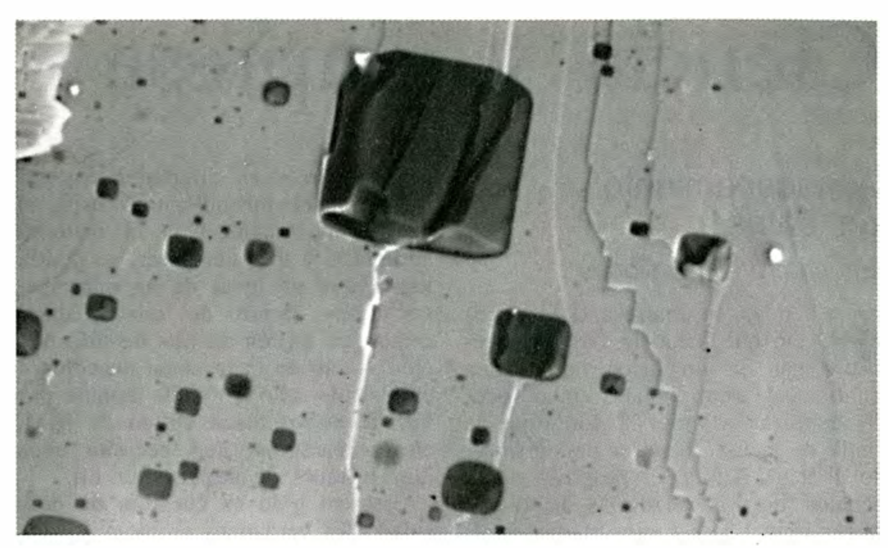
6. MINAS DE POTASA. Los yacimientos de potasa fósiles han sido la única fuente de cloruro potásico hasta tiempos recientes, en que dicha sal también se extrae de modo económicamente competitivo mediante cristalización fraccionada de salmueras de lagos hipersalinos (principalmente del Mar Muerto). La fotografia superior muestra el aspecto estratificado de la sal (*de color anaranjado*) en las minas de Potasas del Llobregat (Barcelona). La fotografía inferior muestra un detalle de la mineralización de silvita (*color rojo*) alternando con halita (*claro*) correspondiente a los niveles potásicos. En la cuenca potásica surpirenaica los niveles mineralizados (como los de la fotografía) pueden alcanzar espesores de varios metros. La producción de K_2O de las minas de potasa españolas está sobre las 750.000 toneladas al año.

nador, podremos contar con una herramienta muy potente en la reconstrucción del funcionamiento de cuencas evaporíticas antiguas. Un ejemplo de ello es nuestro trabajo sobre la evolución de la cuenca salina messiniense de Lorca, en el sureste español. Dicha sal se depositó en una cuenca marina marginal conectada con un Mediterráneo ya hipersalino a causa del bloqueo parcial de la conexión atlántica a través del estrecho de Gibraltar.

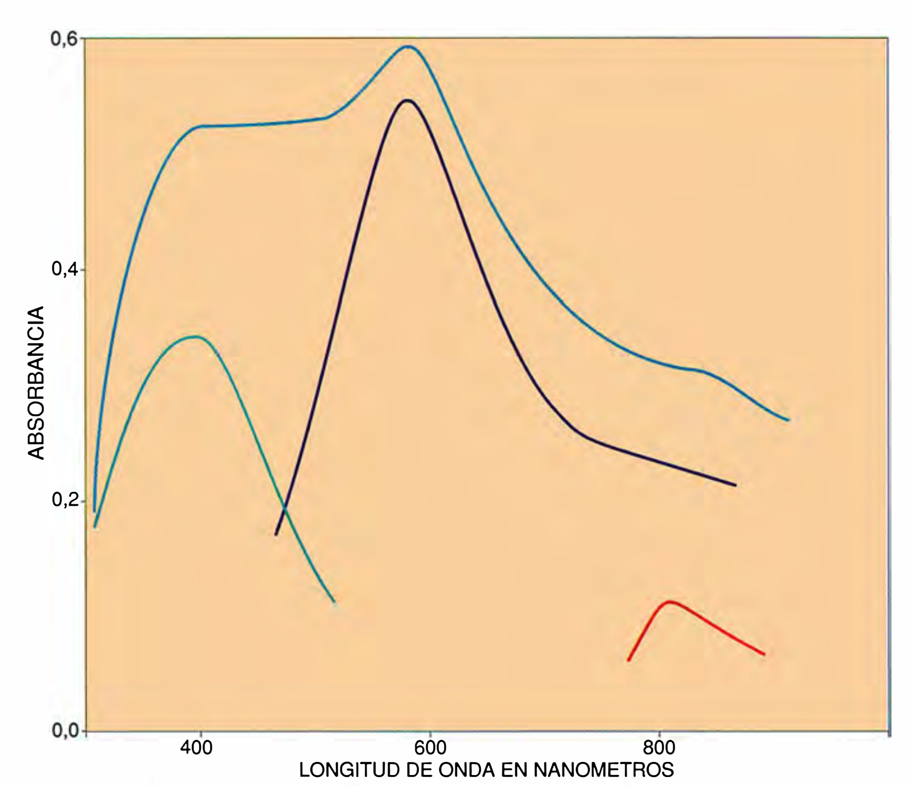
Partiendo de una secuencia vertical de muestras tomadas de un sondeo a testigo continuo que atravesaba toda la formación salina (de unos 200 metros de espesor), se realizaron análisis sistemáticos de inclusiones de salmuera primaria. Se recogieron datos de concentraciones en la salmuera de los iones Na^{+}, K^{+}, Mg^{2+}, Ca^{2+}, Cl^{-} y SO_4^{2-}. A partir de los mismos, elaboramos los perfiles evolutivos verticales de concentración de las salmueras primarias en la cuenca salina. Dichos perfiles muestran una importante diferencia de comportamiento en el tercio superior de la formación. Los resultados experimentales debían ajustarse a los modelos teóricos de evolución de las salmueras sometidas a evaporación. Para ello, utilizando el programa de simulación de evaporación y mezcla de aguas antes mencionado, acotamos los valores de sus variables para ajustarlos a dicha evolución. La modelización permitió establecer la existencia de dos etapas en la génesis del cuerpo salino, proporcionando para cada una de ellas las entradas y salidas de fluidos hacia y desde la cuenca, así como su composición. La parte inferior del cuerpo halítico de Lorca se formó en una cuenca con alimentación básicamente marina. La cuenca se cerró al mar y las salmueras, a partir de las que precipitaron las sales del tramo superior de la serie de Lorca, fueron alimentadas por aguas de origen continental con reciclaje parcial de las sales marinas formadas con anterioridad.

Los resultados obtenidos son coherentes con los datos mineralógicos (sulfatos minoritarios acompañantes de la halita) y con la disminución progresiva del contenido en bromo del registro sedimentario.

La nueva metodología compara los resultados de simulaciones matemáticas con datos analíticos de salmueras fósiles atrapadas en la sal, y se revela como llena de posibilidades en el terreno de la cuantificación aplicada a los procesos sedimentarios y, por tanto, en la reconstrucción de la historia de la Tierra.



7. INCLUSIONES FLUIDAS CONGELADAS a temperatura de nitrógeno líquido (-196ºC). La fotografía se ha realizado mediante un microscopio electrónico de barrido utilizando estativo criogénico. Ello ha permitido exfoliar la muestra en vacío y metalizarla con aluminio, para hacerla conductora. Se realizan así análisis cuantitativos de las salmueras atrapadas en las inclusiones, comparándolas con soluciones de composición conocida. La inclusión mayor (*centro, arriba*) tiene 50 micras de lado.



8. ESPECTRO DE ABSORCION de una muestra de sal irradiada con rayos gamma (*línea azul verdosa*). Mediante técnicas de deconvolución espectral pueden separarse los distintos componentes. En este espectro hay contribuciones de sodio coloidal (*línea azul*; con un máximo a los 600 nm) y centros F, constituidos por un electrón que se aloja en el hueco dejado por un átomo de cloro (*línea amarilla*). A unos 800 nm se observa una pequeña participación de centros M (*línea roja*; dos electrones ocupan el hueco dejado por dos átomos de cloro contiguos).

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE FLUIDS IN SALT. E. Roedder, en *American Mineralogist*, vol. 69, págs. 413-439, 1984.

BRINES AND EVAPORITES. P. Sonnenfeld. Academic Press. 1984.

GÉNESIS DE FORMACIONES EVAPORÍTICAS, MODELOS ANDINOS E IBÉRICOS. Coordinado por J. J. Pueyo. Publicaciones de la Universidad de Barcelona, 1991.

SPANISH PARTICIPATION IN THE H.A.W. PROJECT. C. de las Cuevas, L. Miralles, P. Teixidor, J. García Veigas, X. Dies, X. Ortega, J. J. Pueyo. ENRESA, Publicación Técnica 04/93. 1993.

Ciencia y empresa

Almacenamiento de datos

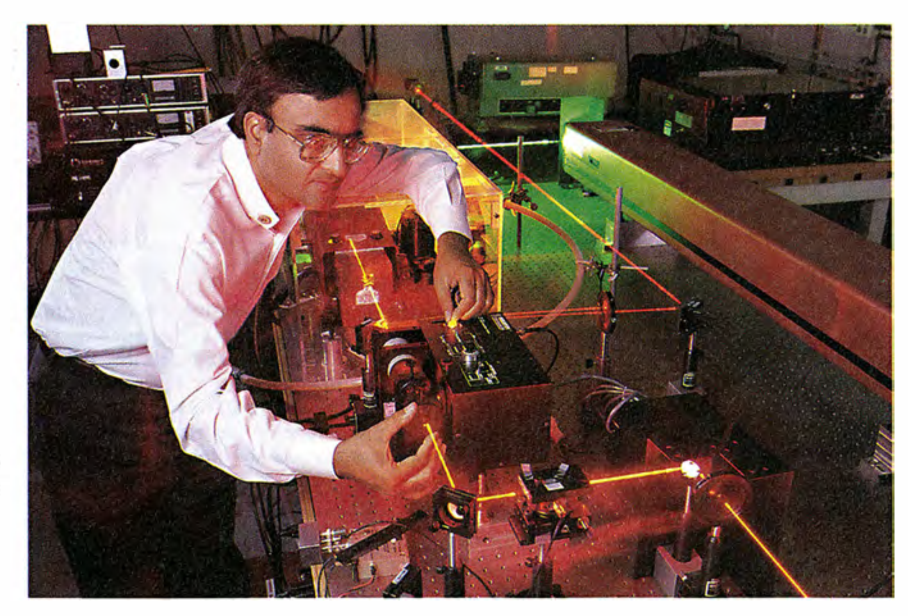
En cuatro dimensiones

En julio, la empresa IBM anunció que había logrado almacenar en un disco óptico una cantidad de datos igual a cinco veces la usual acortando la longitud de onda de la luz del láser del infrarrojo al azul. Ahora, el progreso de la técnica de los CD-ROM habrá de hacer frente a un límite fundamental: los pozos que codifican la información en la superficie de un disco compacto no pueden ser menores que la longitud de onda de la luz del láser que se use para leerlos. El siguiente paso en la densidad de datos tendrá que venir de otra parte.

Hay quienes creen que el salto se dará con cristales capaces de recordar y reproducir configuraciones de luz y color. Los discos compactos almacenan los datos en dos dimensiones; los cristales hacen uso de cuatro: las tres del volumen y el color. Los principios en que se basan las memorias de cristal se establecieron en 1975. Tomemos un material que absorba la luz en un amplio dominio de frecuencias (esto es, colores) y enfoquemos sobre él un haz láser de frecuencia única para crear un "agujero espectral". Alteremos la frecuencia del láser y "quememos" otros agujeros en diferentes colores, todos en el mismo punto espacial dentro del cristal. Con el material apropiado y un buen láser, se podría lograr que un lunar de un micrometro cúbico, dentro del cristal, almacenase un millón de bits de información —uno en cada canal de color— empleando sólo 100.000 átomos por bit. El nuevo disco óptico de IBM, en comparación, aún necesita unos diez billones de átomos por bit.

Pero no todo es cuestión de densidad. "El verdadero problema reside en la velocidad", dice Michael Jefferson, de IBM. A medida que los procesadores ganan velocidad y trabajan cada vez más en paralelo, la lentitud del almacenamiento se convierte en rémora para el ordenador.

La quemadura de agujeros espectrales tiene su propio límite de velocidad, impuesto por el principio de indeterminación de Heisenberg que, formulado de la manera más llana, dice que a la luz no le gusta que la fijen. Para que la frecuencia de un pulso de láser se confine en un estrecho canal, hay que darle al pulso espacio (y tiempo) donde moverse. Esto significa que los pulsos que leen y escriben los datos han de ser largos; efectúan su trabajo pausadamente, tanto, que tardaríase millones de años en quemar los agujeros espectrales necesarios para llenar con datos un cristal del tamaño de una canica.



Los cristales contaminados con iones de metales de tierras raras almacenan los impulsos láser en forma de configuraciones de color. Este aparato, construido por Ravinder Kachru, de SRI International, podría almacenar 50.000 bits en un puntito

En 1982, Thomas W. Mossberg trocó en bendición la calamidad que suponía la ley de Heisenberg. Sugirió el uso de obturadores ultrarrápidos que dividieran el haz láser en pulsos muy cortos, asociado cada uno a un chorro de datos. Fijados en el tiempo, los paquetes de luz se hacen más extensos por lo que a su gama de colores se refiere: es el efecto de la ley de Heisenberg, que los "estira" cromáticamente. Cada pulso, difuminado el color, interfiere con sus vecinos; se produce así una figura de color característica. Cuando la luz incide sobre el cristal, explica Mossberg, "los átomos no ven cada pulso, sino sólo la figura de interferencia que representa de manera única la secuencia de datos entera".

En 1988, Mossberg demostró los principios de una técnica que llamó "memoria óptica en un dominio de tiempo". Usó cristales de óxido de itrio con incrustaciones de iones de europio para obtener mayor memoria. En sus experimentos, un impulso infrarrojo inicial de "escritura" allanaba el camino del subsiguiente chorro intenso de datos —veinte impulsos de activado-desactivado que representaban los unos y ceros del código binario, apretados en el mismo intervalo de tiempo que se necesita para quemar un agujero espectral—. Cuando incide sobre el cristal un impulso de "lectura" idéntico al de escritura, sus moléculas emiten un chorro de luz idéntico a la señal que porta los datos (aunque mucho más débil).

Los primeros experimentos pusieron de manifiesto graves dificultades. Para que el color de los impulsos se difuminara hasta el punto de que llenase la memoria espectral del cristal, debía fragmentarse el haz de luz en impulsos que durasen picosegundos: 25.000 veces menos de lo que Mossberg lograra con sus obturadores acústico-ópticos. El empaquetamiento de todos los datos en un chorro requería láseres muy potentes. Y la información contenida en una casilla de almacenamiento se debía escribir o leer toda de una vez, a velocidades que superaban la capacidad de operación de los ordenadores.

Mossberg volvió al tablero de dibujo e ideó una solución: emplear impulsos de escritura y lectura "gorjeados" —haces de mayor duración cuya frecuencia aumenta constantemente mientras se envían los datos—. El gorjeo permite velocidades de comu-

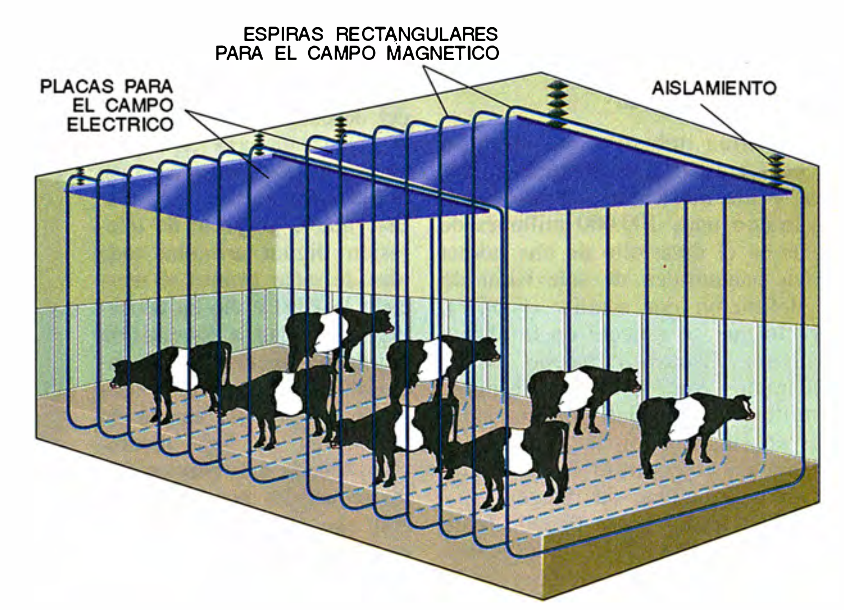
nicación más bajas y posibilita la recuperación de porciones de datos enviando sólo una parte de la señal de lectura. Y lo más importante: para funcionar bien basta un láser de mil pesetas.

Ravinder Kachru ha adaptado la técnica de Mossberg para registrar y recuperar 1600 bits en un solo punto; empleó variaciones aleatorias de fase (en vez del gorjeo); consiguió un efecto similar, aunque con una nueva propiedad: el cifrado natural. Los datos almacenados en el cristal pueden ser recuperados mediante un pulso de lectura cuya forma reproduzca la del pulso inicial de escritura.

En el experimento de Kachru se empleó una pequeña fracción de la capacidad de color del cristal. Incrementando la frecuencia del láser 100 a 100 megahertz, Kachru halló que podía seguir escribiendo paquetes de 1600 bits en el mismo lugar. En resumen, su sencillo aparato llenaba cada lunar de 100 micrometros con al menos 50.000 bits, a razón de 40 millones de bits por segundo. Con láseres más focalizados y obturadores de cristal líquido más rápidos, tal densidad podría multiplicarse por 1000.

Pero la memoria de cristal no ha entrado todavía en el carril de la aplicación. Borrar y volver a escribir es todavía un problema, y los cristales deben mantenerse a menos de 10 grados del cero absoluto o pierden su memoria. Mossberg no cree que sea un problema. Kachru piensa que, sumados el inconveniente de la baja temperatura y la virtud de la velocidad vertiginosa, es más probable que los cristales sucedan a las RAM de silicio que lo hagan las técnicas de almacenamiento en bloque.

Se confía en la obtención de nuevos materiales. Con lo poco que se sabe de la resonancia molecular y los fenómenos de excitación por los que ocurre el almacenamiento en cristales, "no está claro, comenta Mossberg que pueda haber un material que haga esta técnica competitiva. Pero tampoco es obvio que no lo pueda haber." El trabajo continúa. Kachru registra imágenes en cristales. Masaharu Mitsunaga ha escrito datos quemando agujeros espectrales y los ha leído después en forma de señal de dominio de tiempo. Los investigadores del Instituto Politécnico de Suiza han registrado películas holográficas mediante técnicas de dominio temporal. "Esta es la técnica que pueda llevarnos hasta niveles atómicos", dice Mossberg. El almacenamiento de datos en cristales estará en mantillas, pero todavía llevan chupete quienes sabrán de sus posibilidades. (*W. Wayt Gibbs.*)



Establo experimental de la Universidad McGill, donde se estudian los efectos de los campos electromagnéticos en la producción láctea de las vacas frisonas

Magnetismo

En el establo

"Más que establo, es una enorme bobina", dice Javier Burchard, de la Universidad McGill, hablando del que ésta posee en el oeste de la isla de Montreal. El recinto, que había servido para experimentos metabólicos con vacas, ha sido remodelado. Se han enterrado bajo su nuevo suelo de hormigón conductores de cobre que se extienden por las paredes y el techo y forman de metro en metro las espiras de las bobinas que rodean el establo a lo largo de sus 14 metros de longitud. Del techo penden dos placas metálicas cargadas eléctricamente.

El montaje se propone conocer los efectos biológicos de los campos electromagnéticos. A *La Belle Province* canadiense ha llegado la controversia acerca de las consecuencias que el magnetismo tiene para las mujeres embarazadas que trabajan con ordenadores, quienes viven en las inmediaciones de líneas de alta tensión o, en este caso, las vacas frisonas.

Tanto la producción lechera como la de electricidad son industrias muy importantes en Quebec. Las líneas de la Hydro-Québec transportan energía eléctrica a 735 kilovolts desde una gran central en la Bahía de Hudson hasta la frontera de los EE. UU. para su exportación. Pero los de Quebec tienen en mucho sus granjas, y si los campos electromagnéticos deterioraran el rendimiento lácteo de las vacas que pastan bajo las torres del tendido, las repercusiones serían de consideración.

El establo de la McGill, capaz de albergar ocho reses, está preparado para calibrar los efectos de los campos electromagnéticos en los mamíferos. La corriente aplicada a las espiras de la bobina produce un campo magnético de 30 microteslas, igual al que recibiría una vaca que estuviese un día entero bajo una torre de 735 kilovolts a su máxima capacidad. El campo eléctrico generado por las placas del techo es de 10 kilovolts por metro. Se exponen los animales —cuatro grupos de ocho han sido empleados en el transcurso del estudio— a tales campos durante un mes, tras lo cual se desconecta la corriente durante un mes también para determinar si su producción de leche acusa alguna variación. Se controlan la ingesta de alimento, los niveles de hormonas y otros componentes de la sangre.

No fue fácil construir un devanado eléctrico en torno a los muros y techo del establo. El primer generador se quemó; nadie sabía cómo generar un campo magnético uniforme en un espacio tan grande. La separación entre bobinas debía medirse con precisión, so pena de tener que volver a excavar el suelo de hormigón para nuevos ajustes. Hydro-Québec aportó más de 80 millones de pesetas a la investigación, emprendida porque anteriores estudios sobre los efectos de los campos de corrientes alternas en el ganado habían sido defectuosos. La McGill ha propuesto al Consejo Nacional de Investigación un experimento sobre el influjo de las radiaciones electromagnéticas en el sistema inmunitario de las vacas. (*G. Stix.*)

Consorcios y alianzas

Transmisión digital

La política industrial no siempre es rentable. La Comunidad Europea y los fabricantes de televisión malgastaron unos 100.000 millones de pesetas en el desarrollo de una norma técnica paneuropea de televisión de alta definición por satélite (HDTV), proyecto que se canceló en la última primavera. Escaso derroche, si lo comparamos con los cientos de miles de millones invertidos por los japoneses en su afán por alcanzar la hegemonía en el dominio de la televisión de alta calidad de imagen.

Estados Unidos había llegado tarde a la carrera de la HDTV. Ahora podría encabezar la nueva generación de la electrónica de consumo gracias al impulso vigoroso que allí ha recibido la transmisión digital. Los planes, cuidadosamente preparados, de europeos y japoneses se desbarataron con la llegada de los métodos de compresión y modulación digitales, así como por el anuncio, a fines de mayo, de la "gran alianza" de tres consorcios estadounidenses, que rivalizaban en el desarrollo de la televisión digital, de cara a lograr la aprobación del grupo técnico consultor de la Comisión Federal de Comunicaciones (FCC).

Esta técnica desplazará los sistemas híbridos de componentes analógicos y digitales de europeos y japoneses. La mera existencia de una norma técnica no pone en peligro el predominio de Japón y Europa en la fabricación de equipos de producción y televisores. Los emporios europeos —Philips N. V. en Holanda y Thomson Consumer Electronics en Francia— son, de hecho, miembros de la gran alianza. Pero la tecnología digital que se fomenta en Washington da una nueva oportunidad a las empresas norteamericanas de reafirmarse en la electrónica de consumo, oportunidad creada por la fusión de la técnica de la televisión con las de los ordenadores y las telecomunicaciones.

Aunque los japoneses continuarán con el desarrollo de su sistema Hi-Vision, que viene transmitiendo a un limitado número de receptores desde 1991, el Ministerio de Correos y Telecomunicaciones patrocinará el desarrollo de un sistema de transmisión HDTV por satélite completamente digital, con el que pretenden recuperar la primacía. "Vamos a volver donde solíamos", declaró Takehiko Yoshino, subdirector de los Laboratorios NHK.

El progreso de la televisión digital mantiene también a los europeos a la defensiva. El proyecto Eureka lanzó una ofensiva a favor del HDTV con la idea de contrarrestar la que a mediados del decenio de 1980 se creía era una amenaza japonesa. Ahora, la Comunidad también habla con ceros y unos. Este nuevo proyecto de televisión digital arrumba toda idea de sacar pronto al mercado la HDTV. Se ha concedido prioridad a la emisión digital de televisión convencional. La CEE prima la televisión de pantalla amplia en receptores de baja resolución, mucho más baratos que los requeridos por la HDTV; con ese fin, destinará más de 30.000 millones de pesetas para animar a las emisoras a cambiar de formato.



Michel Pelchat, diputado francés, propone que los EE.UU. y Europa lleguen a un acuerdo sobre las normas de televisión

El proyecto digital supone un cambio de rumbo para los fabricantes y emisoras de televisión europeos. Durante años rechazaron la idea de cooperar con sus rivales ultramarinos en la confección de normas universales por temor a que ello abriese el mercado europeo a los japoneses. Ahora, los fabricantes europeos recurren a la misma norma de compresión de señales digitales que los norteamericanos han adoptado ya en gran parte de sus proyectos de televisión. La ironía es tanto más sangrante cuanto que estas normas digitales —llamadas MPEG-2, de las iniciales en inglés de "Grupo de Expertos en Imágenes Móviles"— no funcionan en los televisores existentes sin una "caja" electrónica especial que descifre las señales. Las emisoras tendrán, pues, que emitir las nuevas señales, a la vez que las antiguas, por encima de éstas.

A Philips y Thomson no les queda otro remedio que abrazar el espíritu de cooperación. La fallida política de la HDTV ha debilitado la confianza en la planificación industrial al antiguo estilo, apoyada por potentes grupos de presión. "En el pasado tratábamos de imponerle tecnologías al mercado", dice Robert Boyer, vicepresidente de Thomson. "Esta vez daremos a los clientes el servicio que quieran".

Los responsables de planificación de HDTV no habían contado con la celeridad de las emisoras de televisión en aprovechar los avances técnicos ofrecidos por el mercado. Cuando la News International de Rupert Murdoch puso en antena su Sky Channel como canal de emisión directa por satélite (DBS) a finales de los ochenta, rechazó la norma de la CEE, llamada MAC (de "componentes analógicos multiplexados") en favor de la PAL (alternancia de fase por línea). Al dar este servicio en una banda de comunicaciones de frecuencia más baja, Murdoch eludió la prohibición impuesta por la CEE de transmitir DBS fuera de la MAC. El éxito comercial de esta iniciativa y el fracaso de las que usaban MAC contribuyó a que se sellase la derogación de la norma.

Poco después de un cambio de ministros en la CEE a principios de 1993, se certificó la defunción del proyecto HDTV. Y ahora incluso los franceses, que en el pasado habían sido los más notorios defensores de que las normas europeas fuesen en efecto europeas, se inclinan por la cooperación intercontinental. Michel Pelchat, de la Asamblea Nacional francesa, ha propuesto que Europa y los EE.UU. adopten normas comunes de compresión MPEG y de modulación de las señales.

Si la comisión de la CEE en Bruselas sigue la iniciativa francesa, Europa tratará de conseguir que los EE.UU. acepten otra norma técnica de modulación de la señal transmitida, la "multiplexación de la división ortogonal de frecuencia". Desarrollada en Europa para la emisión digital en audio, aprovecharía al máximo el espectro de frecuencias de que disponen las emisiones de televisión en Europa. Esas normas mejorarían el rendimiento de la producción, pero aun así ciertas diferencias técnicas subsistentes impedirían que los televisores construidos en un continente funcionaran en el otro.

Los fabricantes y emisoras europeos se precipitan entre bastidores a poner en el sitio que se merece el nuevo esquema. De nuevo, el calendario ha sido establecido por Mur-

doch. News International, junto con el Canal Plus francés, espera ofrecer un servicio digital de televisión para 1995. En respuesta, los mismos fabricantes y emisoras que colaboraron en el proyecto original HDTV han formado el Grupo Europeo de Lanzamiento de la Emisión Digital en Vídeo, que espera publicar normas para la transmisión digital terrestre, por satélite y por cable para fines de año. Esto daría suficiente tiempo a Murdoch y demás para que las incorporasen en su oferta.

Volviendo a los EE.UU., la pretendida gran alianza corre el riesgo de convertirse en el gran debate. La coalición, que reúne a Zenith, AT&T, General Instrument, el Instituto de Tecnología de Massachusetts, Philips, Thomson y el Centro de Investigación David Sarnoff de SRI International en Princeton, proyecta entregar para su prueba definitiva un sistema terminado en mayo del año que viene. Mientras tanto, la industria informática presiona a las emisoras y a los fabricantes de equipos para que elaboren una norma técnica que haga que el material de los estudios y los aparatos de televisión sean cien por cien compatibles con los ordenadores.

Sin embargo, los fabricantes de receptores y algunas emisoras arguyen a favor de conservar una tecnología provisional que mantenga bajos los costos y permita un desarrollo más rápido, que quizá pueda llegar a tiempo para los Juegos Olímpicos de 1996. (*Fred Guterl, Robert Patton y Gary Stix.*)

Acierto legal

InVitro como ejemplo

¿Qué hace falta para que se pongan de acuerdo los activistas de los derechos de los animales, los laboratorios y la administración?

InVitro International (IVI) se abocaba a la quiebra. La empresa, radicada en Irvine, tenía dos pruebas *in vitro* (sin animales) de irritación de piel y ojos por las que ingresaba unos doscientos millones de pesetas anuales en ventas a fabricantes de cosméticas y productos de droguería. Tras invertir mucho dinero en la robotización de los equipos, se halló sin liquidez, y acordó una oferta de acciones. Pero sólo unas semanas antes de la venta, la Comisión de Valores y Bolsa acusó de fraude al banquero inversor de IVI. El trato se suspendió, dejando a la compañía sin dinero. El precio de las acciones de IVI se desplomó.

En diciembre, la diosa fortuna acudió en su auxilio. Se compraron 3.400.000 acciones de InVitro a 50 centavos cada una. En junio, su inversión valía más de 42 millones de dólares al dispararse las acciones un 2500 por ciento en seis meses. Desde entonces el precio se ha estabilizado en unos 12 dólares por acción.

InVitro debe su buena suerte al Departamento de Transporte de los EE.UU. (DOT) y a las Naciones Unidas (ONU). Bajo las nuevas normas del DOT y las de la ONU, deben examinarse para su clasificación en una de entre cuatro categorías de cargamentos todas las sustancias potencialmente corrosivas. A las empresas sorprendidas transportando inadecuadamente productos químicos cáusticos pueden caerles multas de más de tres millones de pesetas por carga y día.

Hasta la pasada primavera, la única prueba de corrosivos consistía en aplicarlos sobre los lomos afeitados de seis conejos y observar cuánto tiempo transcurría hasta la "total destrucción de los tejidos". Después del procedimiento, había que matar a todos los conejos, fuese cual fuese el resultado. Una prueba horrible, cara y dilatada en el tiempo.

Además, envejecida desde que IVI sacó la suya, el Corrositex. Consiste en un frasquito lleno de una mezcla de detectores químicos tapado con una membrana de celulosa que soporta un gel de tres centímetros de espesor. Los corrosivos que destruyen completamente la piel (que está fabricada para resistir la impregnación como la piel de conejo y disolverse a la misma velocidad que ésta) cambian el color del fluido detector.

Corrositex fue anunciado en noviembre. Pronto se formó un potente grupo de admiradores del producto, entre los más entusiastas los ecologistas. Dow Chemical, Mobil, S. C. Johnson y Microbiological Associates se ofrecieron para evaluar el artículo.

El paquete *in vitro* de IVI cuesta unas 40.000 pesetas por muestra y da el resultado en un día; las pruebas con conejos cuestan unas 165.000 pesetas y llevan un mes. Aunque las pruebas negativas *in vitro* han de corroborarse con ensayos ulteriores en conejos, la velocidad y sencillez del método del frasquito facilita a las empresas el poder examinar por sí mismas las muestras que antes enviaban fuera. Curiosamente, el procedimiento satisface a los laboratorios; es más rentable que las pruebas en animales.

A InVitro le va muy bien. Gracias a la producción automatizada y a materias primas bastante baratas, sus márgenes son del 80 al 90 por ciento. Prevé que sus beneficios podrían superar los mil millones hacia el otoño de 1994. Trabajan ya en el Ecotox, un producto que comprobará la toxicidad de aguas residuales y desechos industriales. Si recibe idéntica acogida, IVI brillaría como los chorros del oro. (*W. Wayt Gibbs.*)



La prueba para productos químicos corrosivos que muestra William J. Fisher, presidente de InVitro, es la única alternativa al uso de conejos vivos que cuenta con aprobación oficial

Taller y laboratorio

Joseph Neff y Thomas L. Carroll

Circuitos que sincronizan el caos

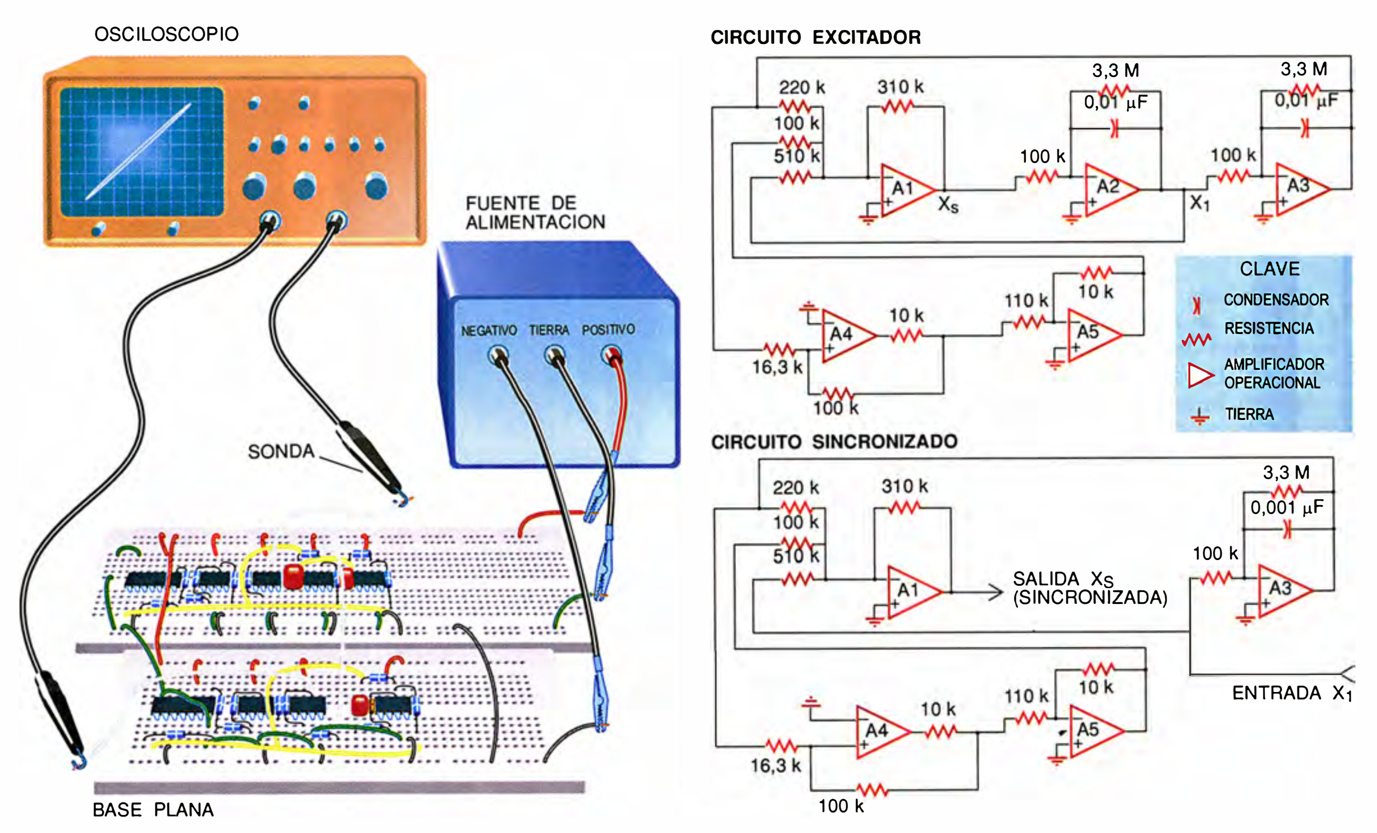
No se crea que el caos es siempre tan caótico. En cierto sentido, hasta puede ser predictible: es posible construir dos sistemas de manera que muestren exactamente el mismo comportamiento caótico. Dicho de otra manera: cabe diseñar sistemas caóticos que estén sincronizados. Semejante estado de cosas proporciona de paso un método criptográfico: uno de los sistemas sincronizados enmascara el mensaje con una señal caótica; entonces, sólo quien posea el otro sistema sincronizado podrá, mediante la sustracción de la señal caótica, descifrar lo transmitido (*véase en este número* "Dominar el caos", de William L. Ditto y Louis M. Pecora).

La idea de la sincronización de sistemas caóticos se le debe a Louis M. Pecora, del Laboratorio norteamericano de Investigaciones Navales. Con Carroll, coautor de la sección de este mes, Pecora demostró, mediante una simulación por ordenador, que el fenómeno era posible. El paso siguiente fue llevar la idea a la realidad con sistemas físicos reales; en concreto, con circuitos eléctricos, que son manejables y baratos. El primer circuito que construyó Carroll para generar caos sincronizado se basaba en un diseño de Robert Newcomb, de la Universidad de Maryland.

Aunque los circuitos que aquí se describen son meras versiones simplificadas del de Newcomb, la experiencia que se gane con su montaje no dejará de resultar provechosa. El año pasado apareció en esta sección una buena introducción a los circuitos caóticos (*véase* "Cómo generar el caos en casa", por Douglas Smith; INVESTIGACION Y CIENCIA, marzo de 1992).

El dispositivo consta de dos circuitos: uno excitador y otro sincro-

JOSEPH NEFF y THOMAS L. CARROLL idearon los experimentos que se describen aquí a partir de los primeros circuitos electrónicos que generaron caos sincronizado, cuyo diseño fue obra de Carroll. Neff, que construyó los circuitos, realiza estudios de física de posgrado en el Instituto de Tecnología de Georgia y aplica programas de ordenador al estudio del caos. Carroll, que se doctoró en física en 1987 por la Universidad de Illinois, trabaja en el Laboratorio de Investigaciones Navales de los EE. UU. Tiene pendientes de concesión de patente varios diseños de circuitos caóticamente sincronizados.



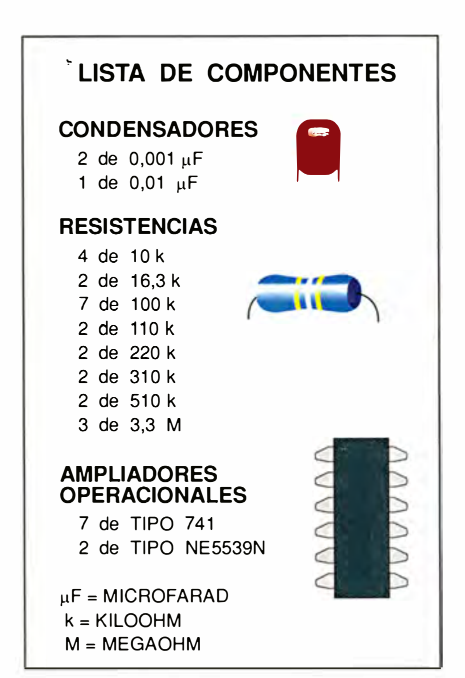
1. LOS CIRCUITOS CAOTICOS producen la misma salida. Reciben la corriente de una fuente de alimentación de 12 volts; un osciloscopio (izquierda) *recoge sus señales. Los valores de los componentes empleados deben coincidir con los indicados en el esquema* (derecha) *dentro de un margen del orden del 1 por ciento.*

nizado (*figura 1*). Ambos son iguales, salvo que el sincronizado carece de un importante componente. Están conectados por un único punto. Si la instalación es correcta, la señal caótica generada por el circuito sincronizado se emparejará con la producida por el excitador.

Antes de comprar los componentes electrónicos y construir los circuitos, hay que disponer de un osciloscopio, bases planas y una fuente de alimentación capaz de producir una corriente continua de 12 a 15' volts (las bases planas son láminas de plástico delgadas con hileras de orificios donde se instalan los componentes). La fuente de alimentación y las bases planas son baratas y fáciles de conseguir. Pero los osciloscopios resultan algo caros. El escogido deberá tener dos canales y la posibilidad de representar gráficamente la entrada de cada uno de ellos en función de la del otro.

Para los circuitos en sí, se necesitan distintas resistencias, condensadores y unos microcircuitos integrados que reciben el nombre de "amplificadores operacionales" (*op-amps*). En la figura 3 se ofrece una lista de estos artículos, con las cantidades mínimas imprescindibles de cada uno. Recomendamos que se compren cantidades mayores: no es raro que se quemen componentes (los mencionados amplificadores, en particular) por fallos en las conexiones.

Dada la estrecha semejanza deseada en los dos circuitos, usaremos resistencias y condensadores que tengan pequeñas tolerancias. Busque resistencias cuyo valor nominal esté garantizado con un 1 por ciento y

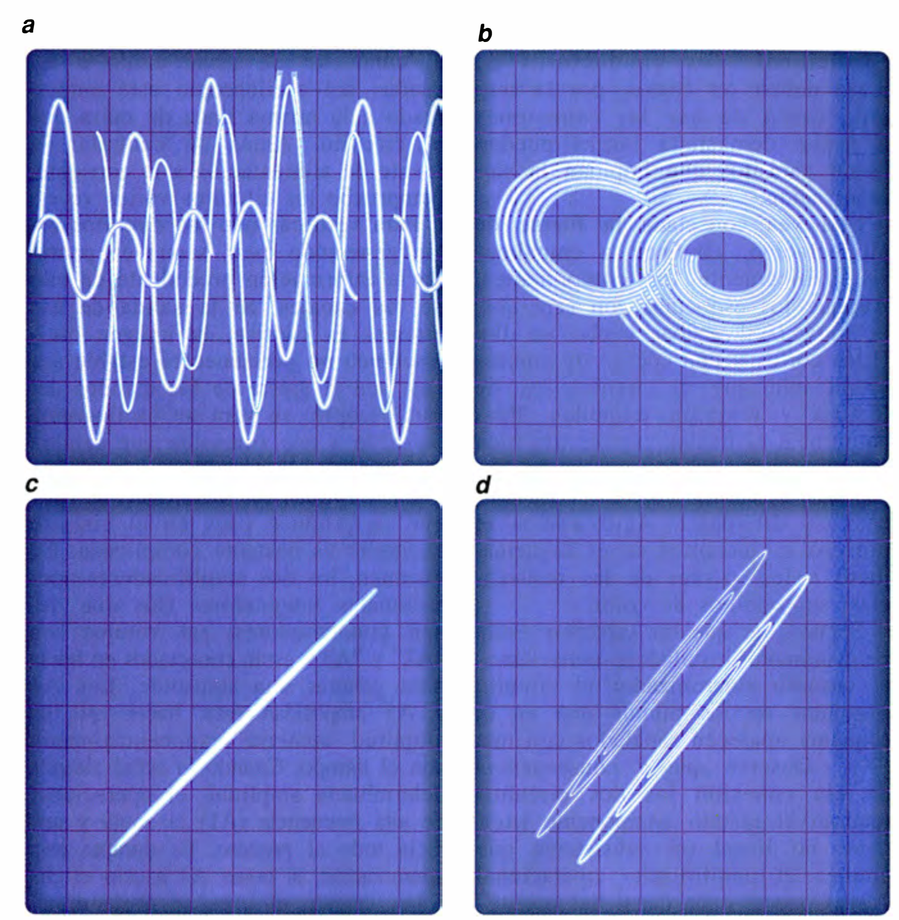

LISTA DE COMPONENTES

CONDENSADORES
2 de 0,001 μF
1 de 0,01 μF

RESISTENCIAS
4 de 10 k
2 de 16,3 k
7 de 100 k
2 de 110 k
2 de 220 k
2 de 310 k
2 de 510 k
3 de 3,3 M

AMPLIADORES OPERACIONALES
7 de TIPO 741
2 de TIPO NE5539N

μF = MICROFARAD
k = KILOOHM
M = MEGAOHM



2. *OSCILOGRAMAS característicos de la actividad de los circuitos sincronizados. La salida caótica de cualquiera de los circuitos por separado se manifiesta mediante la gráfica en pantalla de la tensión de salida en función del tiempo* (a)*; en la figura se incluyen varios barridos. La representación en pantalla de la salida de A2 en función de la de A3 da un atractor caótico* (b)*. La comparación entre las salidas en X_S de ambos circuitos muestra si se hallan sincronizados perfecta* (c) *o sólo parcialmente* (d)*.*

condensadores de polipropileno, cuyas fugas de corriente no sean excesivas. Todos los componentes, salvo los amplificadores, son del tipo genérico 741. Las excepciones, que en el esquema llevan el rótulo "A4" (*véase la parte derecha de la figura 1*), son los amplificadores operacionales del tipo "no compensado de alta frecuencia". Los que utilizamos nosotros eran del tipo NE5539N. Son los dos componentes más críticos del sistema, pues en última instancia a ellos se debe que se mantenga la sincronización de los circuitos.

Usamos los componentes suministrados por Digi-Key Corporation, de Thief River Falls (Minnessota). El precio total no superó las cuatro mil pesetas. Al hacer el pedido, acuérdese de solicitar los diagramas de las patillas de los amplificadores, pues sus conexiones parecen todas iguales. La hoja de especificaciones describe la configuración de las patillas, que le indicará las idóneas.

Para rebajar la probabilidad de fallos en el cableado, coloque, antes de hacer conexión alguna, los elementos de cada circuito ateniéndose a lo señalado en el esquema. Se comenzará por los amplificadores operacionales con una base plana para cada circuito. Adviértase que el circuito de sincronización es igual al excitador, excepción hecha de un amplificador y de sus componentes auxiliares.

Se procede luego a establecer las conexiones de alimentación (antes de empezar, compruebe que la fuente de alimentación está desenchufada). Sólo consumen corriente los amplificadores operacionales. Tienda hilos conductores desde los terminales positivo, negativo y de masa hasta hileras distintas que discurran a lo largo de la parte superior e inferior de la base plana. Esas hileras se limitarán a suministrar tensión eléctrica a los componentes electrónicos. Para determinar las conexiones correctas desde las patillas hacia las hileras hay que servirse de las hojas de espe-

cificaciones de cada amplificador operacional. Los conductores de masa deben ser cortos, por la sencilla razón de que las conexiones a masa demasiado largas pueden captar parásitos que impidan la sincronización.

Una vez conectada la fuente de alimentación, empiece a empalmar sistemáticamente los componentes. Aunque los esquemas son sencillos, es muy fácil acabar hecho un lío. Hilos cortos y con código de colores propiciarán que el circuito sea de lectura y revisión cómodas. Para comprobar si hemos establecido bien las conexiones, recorramos varias veces los circuitos con la vista por caminos diferentes. Agilizaremos el proceso si anotamos en el esquema, junto a los valores de las resistencias, sus códigos de color.

Seguros de que los circuitos están pefectamente instalados, conectemos el circuito sincronizador al circuito excitador en los puntos que en el esquema aparecen señalados con una "X_1". Observe que a consecuencia de esa conexión los dos circuitos tendrán el mismo componente excitador no lineal (el subsistema que emplea el amplificador operacional A2). Conecte cada canal del osciloscopio a los puntos marcados "X_S" en el esquema (se encuentran inmediatamente después del marcador operacional A1). Hay que cerciorarse de que los circuitos y el osciloscopio tienen la misma masa; es decir, que el conductor de masa unido a las sondas del osciloscopio esté empalmado a la misma línea de masa que el circuito. Antes de enchufar la fuente de alimentación a la corriente, compruebe los circuitos varias veces.

Para verificar que los circuitos están generando caos, saque en pantalla la información procedente de uno de los canales. Si la salida de ese circuito es caótica, la imagen osciloscópica no permanecerá estable sea cual sea el ajuste de los mandos del osciloscopio; se verá un oscilograma parecido a una sinusoide que cambia rápidamente de amplitud.

La explicación detallada de por qué se produce caos en el circuito excitador es bastante complicada. En resumen, los dos amplificadores operacionales integradores (los que tienen condensadores; sus rótulos son "A2" y "A3") están conectados en bucle para generar una sinusoide. Los A4 y A5 amplifican ésta: hacen que su amplitud aumente exponencialmente con el tiempo. Cuando la señal alcanza determinada amplitud, el operacional de alta frecuencia (A1) la anula y reinicia todo el proceso. Es durante esta conmutación, al poner A1 a cero el circuito, cuando el caos se cuela en el sistema.

Para comprobar que el caos que los circuitos generan es caos sincronizado, se proyecta en pantalla la salida en X_S de uno de los circuitos en función de la del otro. Si los circuitos están perfectamente sincronizados, el osciloscopio producirá una línea recta inclinada 45 grados. La conmutación provocará, a buen seguro, que la sincronización no sea exacta y el resultado consista en dos líneas ensanchadas y paralelas.

No hay que desanimarse si no se logra sincronizar los circuitos a la primera. Busquemos los contactos defectuosos. Los circuitos son bastante delicados; cualquier empalme flojo puede arruinar la sincronización. La razón última podría estar en un amplificador operacional que funcione mal. Quizá vea que ambos circuitos generan caos, pero no están sincronizados. Habría dos explicaciones posibles. Una: que dos componentes presuntamente muy parecidos difirieran más de lo que debieran; por ejemplo, dos resistencias de 1000 ohm nominales quizá sean de 950 y 1050 ohm. La otra: que el tiempo de respuesta de los amplificadores operacionales de alta frecuencia sea insuficiente; en tal caso tendría que sustituirlos.

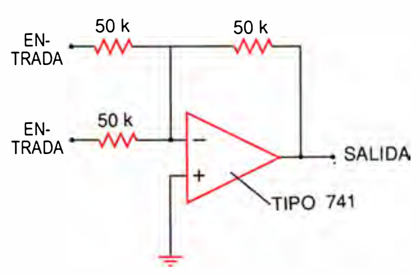
Una vez que los circuitos caóticos sincronizados trabajen ya correctamente, podrá realizar el criptografiado de mensajes imaginado por Pecora y Carroll. Para ello le harán falta dos amplificadores operacionales más y varias resistencias grandes (de gran impedancia). Con estos componentes es fácil construir dos circuitos "amplificadores sumadores", que suman efectivamente dos señales y luego las invierten. Se conectan a los circuitos excitador y sincronizador tal como se muestra en la figura 3. El mensaje que codificamos era una sinusoide simple creada por un generador de funciones. Se alimenta uno de los circuitos amplificadores sumadores con la sinusoide; el circuito la combina con el caos generado por el circuito excitador, e invierte la señal resultante. Sumergida la sinusoide de esa manera en caos, resulta casi imposible descifrarla.

Pero al circuito sincronizador no le cuesta mucho extraerla del caos. Como produce la misma figura caótica que el excitador, basta con sumar la señal caótica que emite a la señal (invertida) del circuito excitador. Lo que queda es el mensaje. El segundo circuito amplificador sumador realiza este trabajo, e invierte otra vez la señal para devolverle su forma original.

Los circuitos amplificadores sumadores pueden hacer que el sistema entero se comporte de manera un tanto errática; la imagen osciloscópica quizá se dilate. El problema reside en que los dispositivos externos drenan algo de corriente y con ello provocan que los circuitos salten de un atractor caótico a otro. (Llámase atractor caótico a la figura en torno a la cual tienden a estabilizarse las señales caóticas.)

Las resistencias grandes ayudan a mitigar el problema al evitar el drenaje de corriente. Nosotros empleamos resistencias de 60 kiloohm y un megaohm, aunque es probable que

CIRCUITO AMPLIFICADOR-SUMADOR



SEÑAL A ENMASCARAR
CIRCUITO EXCITADOR
X_1
X_S
X_1
X_S
SEÑAL A RECIBIR
CIRCUITO SINCRONIZADO
CIRCUITO AMPLIFICADOR-SUMADOR

3. *EL CIRCUITO AMPLIFICADOR SUMADOR* (arriba) *suma en efecto a la señal de entrada una señal caótica y luego invierte esa combinación. Cuando se conectan dos circuitos de este tipo a los circuitos caóticos sincronizados se produce una forma de criptografía* (abajo).

nos hubiera bastado con 50 kiloohm. Otra manera de reconducir el circuito a un solo atractor consiste en cortocircuitar periódicamente un amplificador operacional. Para ello se roza levemente la salida de uno de los operacionales (lo preferible es que sea uno de los que tienen condensador) con un conductor puesto a masa. Con esta operación vuelve a cero aleatoriamente el estado del circuito. Mientras el contacto sea muy breve, no se estropearán los amplificadores operacionales. Apagando y volviendo a encender la fuente de alimentación se consigue lo mismo.

Si quiere que el mensaje se escuche tendrá que amplificar la salida. Los amplificadores operacionales no producen mucha corriente (ni las resistencias de gran impedancia facilitan las cosas). Un sistema estéreo es una buena solución. Puede también consultar un manual de electrónica básica donde se explique cómo construir un circuito amplificador sencillo que accione un altavoz pequeño.

Intente la codificación de señales más complicadas que la sinusoide. Envíe mensajes audibles mediante un micrófono, que convierte las ondas sonoras en señales eléctricas que sí se pueden enmascarar. O pruebe con mensajes en código Morse, donde cada "clic" manda una señal de tensión eléctrica constante. En el extremo receptor conecte una bombilla pequeña o un diodo emisor de luz, que destellará al unísono con los clics si los circuitos funcionan correctamente.

Verá también los efectos de los atractores en el caos si representa en pantalla la salida de uno de los amplificadores operacionales integradores en función de la del operacional vecino. Una entrada así genera una figura espiral pulsátil muy espectacular que testimonia la existencia de un atractor simple. No tenga miedo y cambie algunos de los componentes para ver qué pasa. Recuerde: se trata de crear el caos.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

NONLINEAR CIRCUITS HANDBOOKS. Analog Devices Engineering Staff. Analog Devices, Norwood, Mass, 1976.

DYNAMICS: THE GEOMETRY OF BEHAVIOR, Parts 1-4. Ralph H. Abraham y Christopher D. Shaw. Aerial Press, 1985.

INTRODUCTORY ELECTRONICS. Robert E. Simpson. Allyn and Bacon, 1987.

THE ART OF ELECTRONICS. Paul Horowitz y Winfield Hill. Cambridge University Press, 1991.

Juegos matemáticos

Ian Stewart

Una rueda de forma arbitraria mantendrá su eje a altura constante si se mueve sobre una calzada de perfil adecuado

Roque Cascarrocas, director general de la Concesionaria de Obeliscos Públicos estaba de un humor de perros. Cuando rechinaba los dientes casi saltaban chispas.

"Si el negocio no levanta, me veré obligado a racionalizar la gestión."

Su aprendiz, Abel Hisco, estaba menos animado aún. ¡Demasiado bien conocía el significado de "racionalizar la gestión"! Nunca era precisamente la gestión lo racionalizado.

La gente de los pantanos es de por sí de carácter serio, y esta recesión era difícil de digerir. O los hierofantes habían sacrificado una cabra de raza impía a los dioses benefactores o una cabra de buena raza a los dioses malvados, o quizá la cabra era la adecuada y los dioses los debidos, pero el altar... Sea como fuere, en lugar del Panteón de la Prosperidad, lo que habían traído a sí era un Viacrucis de Crisis. No hacía falta un máster de la Escuela de Administración de Empresas de Harvard para certificarlo. Los economistas parecen siempre convencidos de que un sacrificio más, una última cabra, hará arrancar la economía. Lo único que consiguen es que las cabras suban de precio.

"Necesitamos lanzar un producto nuevo —opinó Hisco.

–No es tan sencillo —opuso Roque—. Estoy endeudado hasta las orejas; no puedo ni dar un mal pelotazo. Y las campañas de lanzamiento son un pastón."

Quedaron en silencio.

"Es preciso sacar algo con lo que tenemos —arrancó Roque bruscamente—. A ver, Abel, ¿qué existencias hay?"

Abel pasó la mirada por la cantera.

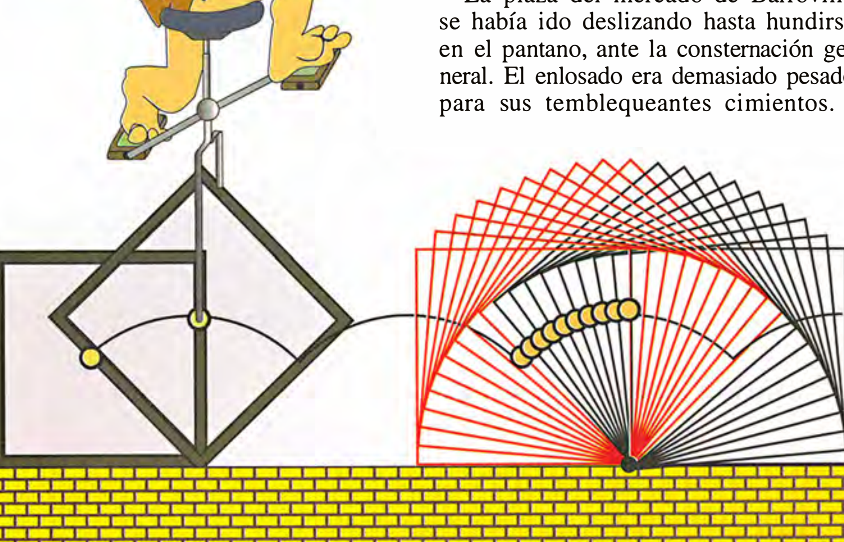
"Tenemos losas cuadradas.

–Magnífico...

–Tenemos un enorme montón de losas. Una reliquia del contrato de Barrovilla. Inutilizables, ahora que el mercado se ha hundido.

–El mercado de Barrovilla... ¡Vaya timo!"

La plaza del mercado de Barrovilla se había ido deslizando hasta hundirse en el pantano, ante la consternación general. El enlosado era demasiado pesado para sus temblequeantes cimientos.



1. Trayectoria del eje de un cuadrado que rueda sobre una base rectilínea

"¿Por qué no les hacemos a las losas un cuadrado en el centro y las ofertamos como ruedas de carreta? —propuso Abel Hisco.— Puede incluso que fuera mejor darles forma triangular.

–¿Son mejores las ruedas triangulares que las cuadradas?

–Bueno... dan una sacudida menos."

Abel se levantó de un salto, cruzó la cantera y tomó una losa cuadrada.

"Observe atentamente, jefe. Voy a hacer girar la losa. Tome usted nota de lo que pase.

–Si te empeñas... Primero pivota sobre un vértice y luego se detiene con un golpazo sordo cuando el lado siguiente cae al suelo. Y eso se repite, una vez, y otra, y otra...

–¿Y si pasara un eje por su centro...?

–Pues... yo creo que el eje describiría una serie de arcos de 90° de amplitud [*véase la figura 1*].

–Así es, sí. El eje va subiendo y bajando, y en cada punto donde se cortan los arcos, esto es, cuando los lados chocan contra el suelo, da un golpetazo. Me parece que viajar así iba a resultar incómodo.

–Pues claro. La rueda no tiene la forma apropiada.

–Eso es lo que yo pensaba al principio también. Pero es que no lo miraba desde el ángulo apropiado. No es la rueda, sino la carretera, la que no tiene el perfil adecuado."

Roque Cascarrocas frunció el ceño, perplejo.

"Imagine —dijo Abel— que la carretera fuera subiendo y bajando lo justo para compensar el movimiento vertical del eje. Tendríamos entonces un viaje sin sacudidas.

–¿Quieres decir que habría que modelar el firme, dándole la forma de una sucesión de cuadrantes invertidos? Oye, si la idea prendiera, podríamos dedicarnos a tallar losas en forma de cuadrante para pavimentar la carretera. ¡Harían falta miles...! ¡Y eso sólo para la carretera de Barrovilla!

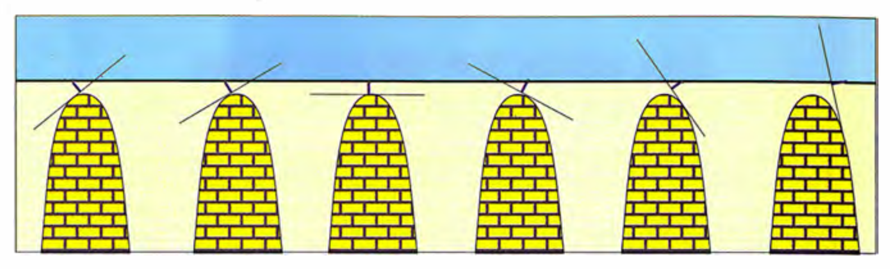
–Ha captado usted la idea general,

Roque, pero no me parece que la cosa sea tan sencilla. La rueda, al avanzar, sigue un movimiento bastante complicado. Me sorprendería mucho que bastara con invertir la trayectoria del eje. Eso compensaría el movimiento vertical, pero me da la impresión de que el movimiento horizontal no iba a ser uniforme.

–Seguramente. Abel, muchacho, lo veo demasiado complicado para nosotros. Tendremos que consultar a Atchismisha, la hija de Güisquiatchís, que es experta en numerosofía."

Patrón y empleado emprendieron camino hacia el pantano del Gato Muerto.

"Es un problema muy interesante —dijo Atchís—. Sobre todo viniendo de dos patanes como vosotros. Dada una rueda de perfil arbitrario y un punto fijo de ella, por donde ha de pasar el eje, ¿existe una carretera sobre la cual pueda rodar ese perfil sin deslizamiento, de suerte que el eje se desplace horizontalmente, sin subir ni bajar? O a la inversa, dado el perfil de la carretera, ¿existe una rueda que pueda rodar sobre ella cumpliendo las condiciones anteriores? Desde luego, si deseamos que la rueda sea una curva cerrada, la carretera tendrá que ser periódica y el movimiento del eje tendrá que repetirse indefinidamente."



2. Una recta que rueda sobre una calzada formada por catenarias. La trayectoria del eje es horizontal

La muchacha se puso a revolver en un revoltijo de zarapitos cortados en forma de dados, de bellotas marinadas, de colas de rata trenzadas y demás instrumentos de numerosofista profesional. Acabó extrayendo una cajita de arena y un bastoncito.

"Es mi computadora —dijo Atchís. Extendió arena por el suelo y la roció con lejía concentrada—. Así elimino los virus —explicó."

Volvió a guardar la arena en la cajita.

"¿Qué quieres calcular?

–Me parece que la rueda más sencilla será la línea recta.

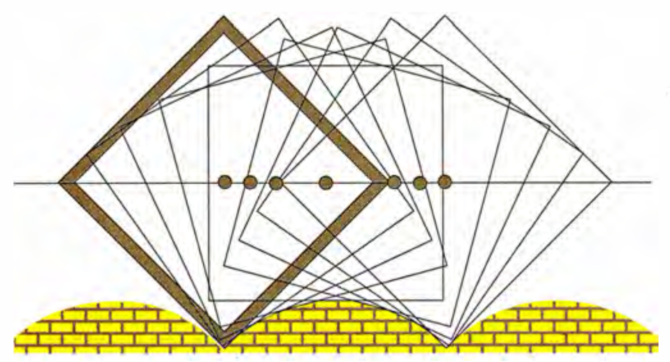
–Eso no sería una rueda, sino un esquí.

–No, no. No se trata de que deslice. Hay que hacer rodar la recta sobre una cierta curva. La cuestión es: ¿qué curva hemos de elegir sabiendo que el eje se encuentra a cierta distancia fija por encima de la recta?

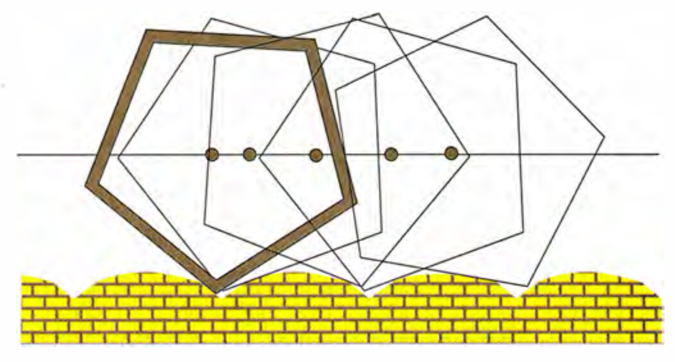
–Pero, ¿qué relación tiene eso con las ruedas cuadradas?

–Un cuadrado está formado por cuatro lados rectos. Uno de ellos rueda cierto tiempo, después llega el lado siguiente, y así una y otra vez. Si consiguiera encontrar una carretera adaptada a una rueda con forma de recta podría, adosando muchas copias parciales, tener una carretera para ruedas cuadradas."

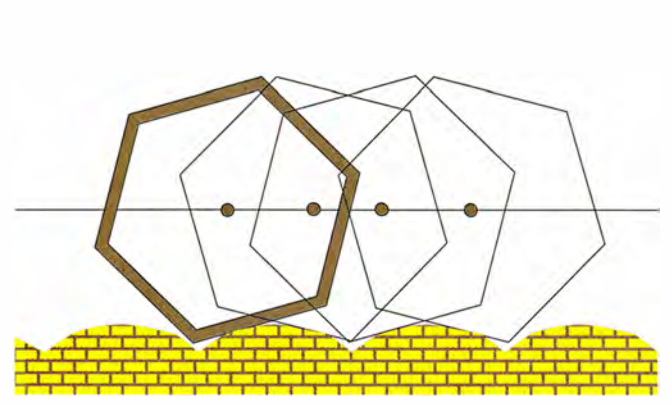
La joven garrapateaba en la arena, deteniéndose de cuando en cuando para espantar algún gazapo (inquietos animales que medran en las computadoras arenarias y son mucho más difíciles de eliminar que los virus). Se detuvo con un último ademán del brazo.



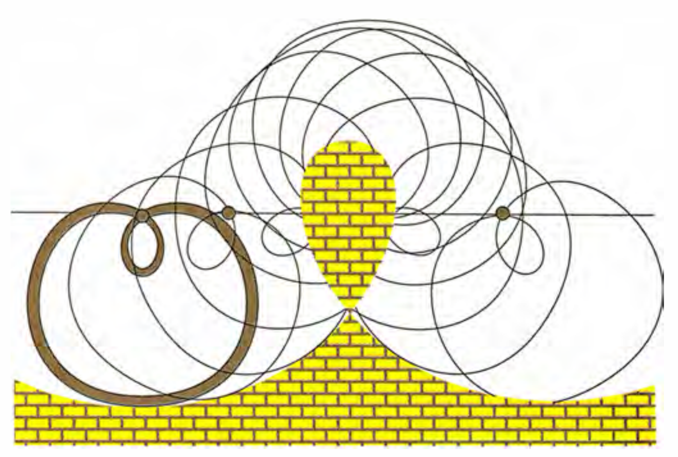
3. Calzada formada por catenarias, apta para ruedas cuadradas



4. Calzada, también formada por catenarias, para ruedas pentagonales



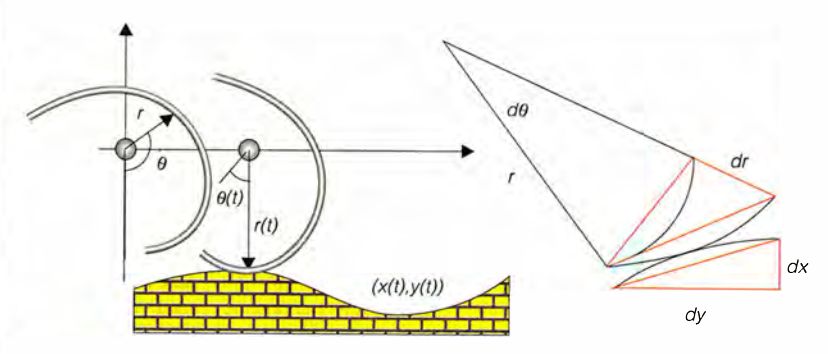
5. Carretera de catenarias para ruedas hexagonales



6. Calzada trocoidal apta para el caracol de Pascal

UNA ECUACION DIFERENCIAL QUE RELACIONA RUEDAS Y CARRETERAS

Resulta cómodo describir la carretera en coordenadas cartesianas y la rueda en coordenadas polares, con el polo en el eje, porque la rueda gira y la carretera no. Supongamos, pues, que la carretera sea una curva plana parametrizada por $(x(t), y(t))$, y que el punto por donde pasa el eje describe el eje de las x en su movimiento. Entonces, para todo t, $y(t) \leq 0$. Escribamos la ecuación polar de la rueda en la forma $r = r(\theta)$. Al rodar, como vamos a ver, el eje de la rueda se encuentra siempre en la vertical definida por el punto de contacto de la rueda y la calzada, y su movimiento de rotación está descrito por una función $\theta(t)$.



Estas diversas funciones han de verificar las condiciones siguientes:

1. El punto de contacto inicial se encuentra en $(0, y(0))$, con lo que

$$\theta(0) = -\pi/2$$

2. Para todo valor de t el arco de carretera de 0 a t tiene la misma longitud que el arco de rueda de $\theta(0)$ a $\theta(t)$. Expresamos así que la rueda, al rodar, no tiene deslizamiento.

3. El radio de la rueda es igual a la "profundidad" de la rueda; esto es: $r[\theta(t)] = -y(t)$. (El centro instantáneo de rotación de la rueda se encuentra en el punto de contacto entre rueda y calzada. En la rotación, la altura del eje no debe variar y su vector de velocidad instantánea debe ser horizontal. Por lo tanto, el radio de rotación instantánea de la rueda es igual a la profundidad de la calzada.)

Supongamos dada la carretera (o sea, que las funciones $x(t)$ e $y(t)$ son conocidas) y busquemos $r(t)$ y $\theta(t)$, o sea, la rueda y su movimiento. La idea es determinar $\theta(t)$, porque entonces $r(t)$ resultará de la condición 3. Utilizando la fórmula de la longitud de un arco se demuestra que:

$ds^2 = r^2 d\theta^2 + dr^2 = dx^2 + dy^2$, en la cual, como $dr = -dy$, $dx = -r d\theta$ y

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{dx}{dt}\frac{1}{y}$$

En el caso de que la carretera sea una curva de ecuación $y = f(x)$, la ecuación anterior adopta la forma simplificada:

$$\frac{d\theta}{dt} = -\frac{1}{f(x)}$$

No es seguro que la rueda se cierre sobre sí misma. Si la carretera de ecuación $y = f(x)$ tiene período a, esto es, si para todo x se verifica $f(x + a) = f(x)$, la condición para que la curva que define a la rueda sea cerrada es que

$$\frac{1}{2\pi}\int_0^a -\frac{dx}{f(x)}$$

sea un número racional. Cumplida esta condición, en general será preciso que la rueda gire varias veces en torno a su eje para que la carretera y ella vuelvan a encontrarse en las posiciones relativas iniciales.

Por convenio, no está matemáticamente prohibido que la rueda pase a través de la carretera. Así, en la figura 6 vemos cómo un caracol de Pascal atraviesa la calzada trocoidal correspondiente. Los ingenieros protestarán. ¡Que lo hagan si quieren!

Recíprocamente, la ecuación diferencial adjunta a la condición 3 permite determinar $x(t)$ e $y(t)$ dada la ecuación $r(\theta)$ de la rueda.

"Vaya, jamás lo hubiera sospechado...

–¿Has encontrado algo?

–La curva es una catenaria [*véase la figura 2*].

–Impresionante.

–Sí —dijo Abel, sin convicción—. Esto... ¿qué es una catenaria?

–Es la curva definida por una cadena pesada que pende por acción de la gravedad. En nuestro caso, la catenaria hay que dibujarla vuelta hacia arriba.

–Ya veo.

–Si enlazo convenientemente arcos de catenaria de manera que formen ángulo recto en el punto de empalme, obtendré una carretera adaptada a ruedas cuadradas [*véase la figura 3*].

–¡Caray! ¡Muy bien pensado, Atchís!

–Ya dije yo que iban a ser cuadrantes invertidos —se ufanó Roque.

–Es cierto. Lo que pasa es que ni son cuadrantes ni están invertidos.

–Pero reconocerás que no estuve lejos.

–Conjeturo que con distintos arcos de catenaria podríamos conseguir carreteras adaptadas a cualquier polígono regular —reflexionó Atchismisha—. Por ejemplo, pentágonos o hexágonos [*véanse las figuras 4 y 5*]. ¿Podríamos conseguirlo para polígonos irregulares? Me pregunto cuál es la relación general entre la rueda y la calzada."

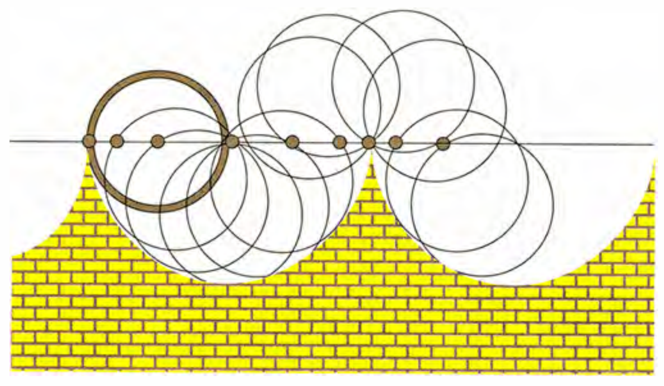
Atchís se puso nuevamente a trazar símbolos en la arena. Su resultado final se muestra en el recuadro adjunto. Las curvas de la rueda y de la calzada están relacionadas por una ecuación diferencial.

Si elegimos un perfil para la calzada y optamos por una altura del eje, existe una única rueda capaz de rodar sobre esa calzada y cuyo eje describa una recta horizontal. En cambio, si hacemos variar la altura del eje podemos obtener una infinidad de curvas capaces de rodar sobre una misma calzada. Por ejemplo, una rueda circular puede tener el eje en su misma circunferencia a condición de que la carretera esté formada por semicírculos cuyo radio sea doble que el de la rueda [*véase la figura 7*].

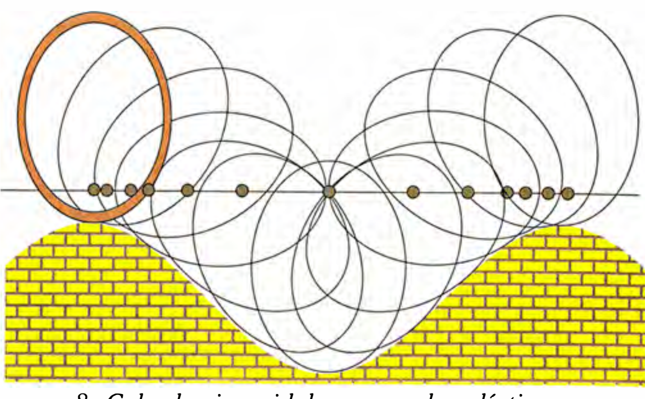
"Ahora puedo encontrar una multitud de ejemplos —dijo Atchismisha—. Es una ecuación diferencial tan sencilla que es posible escribir explícitamente toda clase de soluciones.

–¿Cuáles, por ejemplo?

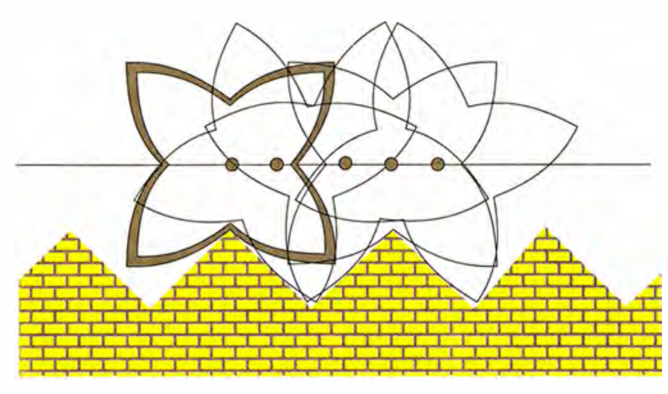
–Si la carretera es sinusoidal, la rueda ha de ser elíptica, con el eje pasando por uno de los focos [*véase la figura 8*]. Si la carretera fuese una



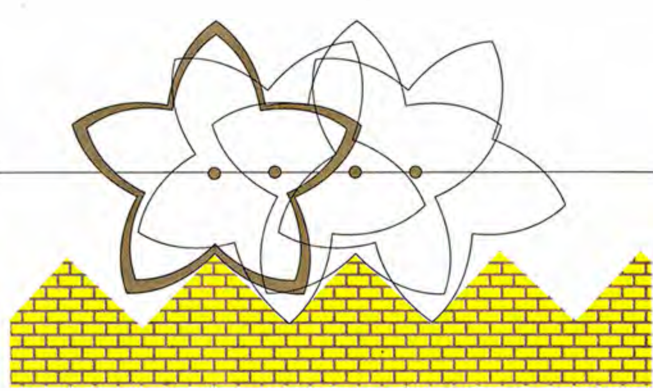
7. Calzada semicircular para ruedas con el eje en el contorno



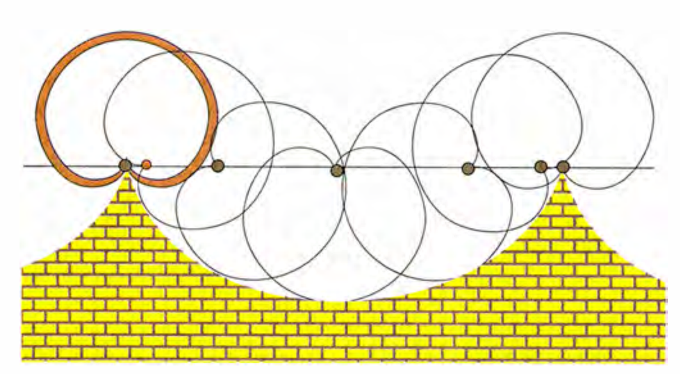
8. Calzada sinusoidal para ruedas elípticas



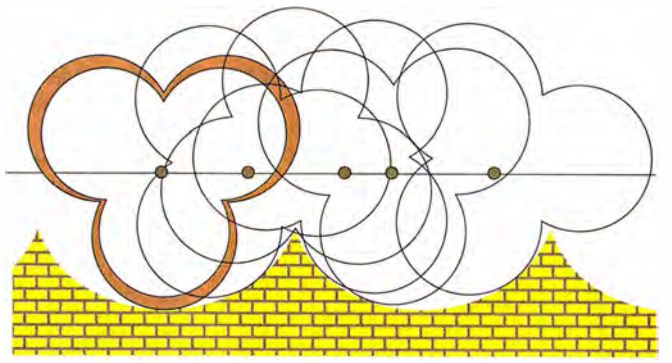
9. Calzada en dientes triangulares para rueda espiral de cuatro ramas



10. Calzada triangular para espirales de cinco ramas



11. Carretera cicloidal para ruedas cardioides



12. Carretera cicloidal para ruedas en forma de trébol

recta inclinada, la rueda tendría que ser una espiral logarítmica [*véanse las figuras 9 y 10*]. Si la carretera es una cicloide invertida, una rueda posible sería una cardioide [*véase la figura 11*], aunque realmente la rueda se hunde un poco en la carretera. Si la cicloide estuviera un poco más baja (o el eje más alto), la rueda podría tener la forma de un trébol de tres hojas [*véase la figura 12*].

–Muy bonito —dijo Abel—. ¿Y no podría ser de cuatro hojas?

–Es posible, sí, elevando un poco más el eje. He aquí un bonito ejemplo de cómo ruedas diferentes pueden rodar sobre una misma carretera.

–A la gente le va a encantar tener carretas con tréboles de la suerte por ruedas —dijo Abel, pensativo—. ¡Es genial!

–¿Y eso podrá tener interés comercial? —preguntó Roque, dubitativo.

–¡Pero jefe...!, ¿no se da cuenta? ¿No ve las posibilidades?

–Ni flores."

Abel miró a Atchismisha.

"Díselo, Atchís.

–Basta ya. No me llames así. Fíjate, Roque, piensa. ¡Ruedas de diseño!

–¡Y carreteras de diseño! Un juego de carreteras para ruedas cuadradas, otro para ruedas pentagonales... Nos cuidaremos muy bien de que en materia de ruedas vayan cambiando las modas, ¡y así no sólo tendremos ruedas que construir, sino carreteras que pavimentar! ¡Roque, tenemos garantizada la fortuna!"

El rostro habitualmente sombrío de Roque se iluminó durante unos segundos. Pero enseguida recobró su habitual severidad.

"Abel, no nos permitirán implantar transportes tan costosos.

–¡Oh, sí!

–¿Cómo estás tan seguro?

–Porque enseguida se les ocurrirá cobrar peaje."

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

ROCKERS AND ROLLERS. G. B. Robinson, en *Mathematics Magazine*, vol. 33, pág. 139-144, 1960.

A CATALOG OF SPECIAL PLANE CURVES. J. D. Lawrence, Dover Publications, Nueva York, 1972.

ROADS AND WHEELS. Leon Hall y Stan Wagon, en *Mathematics Magazine*, vol. 65, págs. 283-301, 1992.

Javier de Lorenzo, Ignacio García de la Rosa, Luis Alonso

Descartes

Su papel en la historia de la ciencia

THE MAGIC OF NUMBERS AND MOTION. THE SCIENTIFIC CAREER OF RENÉ DESCARTES, por William R. Shea. Science History Publications, U.S.A., 1991.

La obra se propone un objetivo explícito: seguir a Descartes en su trayecto vital y, con ello, dar un recorrido lo más completo y exhaustivo de su "carrera" científica, desde sus días de estudiante hasta su partida y fallecimiento en Suecia. Con una pretendida salvedad y es la de que el término científico lo interpreta en su sentido genuinamente epistemológico: aquello que se plasma en proposiciones verdaderas frente a lo que se muestra como meramente probable. Shea observa que la obra de Descartes presenta una gran variedad de facetas que van del filósofo al matemático pasando por el teólogo y el científico-natural.

Con ese objetivo y ante la variedad de facetas, Shea va realizando un estudio muy detallado del trabajo matemático, musical-matemático, mecánico, óptico, cosmológico... cartesianos. Como puntos base, tanto los libros y cartas de Descartes como los de Mersenne, Beeckman..., en una lectura de primera mano, aunque en ocasiones, muy pocas, se haga referencia a trabajos actuales.

En cuanto al trabajo matemático querría destacar el énfasis que Shea da a la construcción del compás con el que Descartes logra la plasmación de medias proporcionales. Rastreando el origen de esta construcción, cree encontrarlo en la música, adaptación de modelos meramente mentales como el elaborado por Zarlino. En Descartes se convierte en instrumento mecánico que posibilita la resolución de problemas como la duplicación del cubo o la trisección del ángulo. El primero conduce, por dos medias proporcionales, a resolver la ecuación cúbica. En esta línea, Descartes va más allá y enlaza con la resolución de ecuaciones de cuarto y quinto grado mediante el manejo de cónicas. Esta potencia resolutiva conduce a un joven Descartes a pretender haber encontrado un método general, universal para la resolución de todos los problemas —tanto matemáticos como musicales y, con ellos, los de consonancia y armonía. Es método que, sin embargo, encuentra sus límites, no reconocidos como tales por Descartes, en la clasificación algebraica de las curvas que, en el caso de no algebraicas, se le muestran como no rectificables. La rectificación de las mismas, por parte de Fermat, entre otros, constituirá una demarcación de tal método.

Lo interesante en el trabajo de Shea es haber puesto de relieve el papel del compás cartesiano en el desarrollo conceptual posterior de Descartes precisando cómo su trabajo, más que una algebrización de la geometría, debe enfocarse como la realización de procesos constructivos a partir de movimientos continuos. Es precisión de carácter histórico en el sentido de que la geometría constituye, de facto, tal proceso algebrizador a pesar de que Descartes no lo viera así, desde la interpretación de Shea.

En el capítulo dedicado a la óptica, cabría destacar la exposición de cómo Descartes deriva la ley de la refracción de la luz desde principios mecánicos y cómo, por ello, no puede mantenerse que siguiera la línea de Snell, a quien se atribuye dicha ley. Como consecuencia, aparece el análisis cartesiano del arco iris. En este capítulo Shea tomará la frase de Descartes en carta a Mersenne de 31 de marzo de 1638 donde afirma: "Kepler fue mi primer profesor en óptica." Uno de los poquísimos lugares en los cuales reconoce haber aprendido algo de alguien.

En esta línea creo muy interesantes las páginas que se dedican a las relaciones entre Beeckman y Descartes, surgidas el 10 de noviembre de 1618, en Breda. Relaciones que Descartes llegó a distorsionar terminando por acusar a Beeckman, incluso, de plagio. El descubrimiento del diario de este último en 1905 y su edición entre 1939 y 1945 ha permitido precisiones y rectificaciones que Shea maneja plenamente, con la consecuencia de que es el comportamiento de Descartes el que no sale muy bien parado.

A destacar, igualmente, el capítulo 5, dedicado a las posibles relaciones entre Descartes y la Ilustración Rosacruciana. Aquí se incardina una problemática y es la del posible influjo del simbolismo cosmológico matemático, conducente a los tres sueños de 1619 que afirmaron la búsqueda de un método universal y, con él, el esbozo de una nueva filosofía de la naturaleza, muy diferente de la aristotélica. Aunque Shea reconoce la posibilidad de una presentación meramente contextualizada de los sueños, insistiré en el papel que junto a la razón metódica presenta la mística en el pensamiento total cartesiano. Racionalista sí, pero... creyente en la revelación. Más, creyente en la unión de religión y ciencia como claves para restaurar el conocimiento humano (p. 345). Y de aquí que Shea concluya este trayecto con la afirmación de que la magia de los números y el movimiento está enraizada en la racionalidad trascendente del Espíritu Ultimo (p. 349).

El libro de Shea es una obra magnífica en cuanto al análisis y exposición de los trabajos científicos cartesianos; una obra que puede considerarse como de referencia obligada en el futuro para quien se inicia en la lectura de las fuentes cartesianas. Uno de los intentos creo que radicalmente logrado con el que Shea inicia este trabajo.

Sin embargo, se me presenta un problema: no es que en Descartes existan multitud de intereses que vayan desde la óptica a la matemática, desde la teología a la ciencia natural, como parece desprenderse de este magnífico libro cuyo subtítulo —la carrera científica— ya es un total anacronismo. En Descartes, en todos sus contemporáneos, no había esa escisión, no había un científico y menos aún una carrera científica. Era filósofo natural y, como tal, los distintos campos en los que hoy se escinde el conocimiento se mostraban inexistentes. Desde esta

posición, el libro de Shea no muestra en modo alguno las interconexiones entre ese todo que es la filosofía natural cartesiana. Es libro que parece integrarse más bien en la corriente que ha surgido desde la historia de la ciencia y que se centra en prestar atención preferente a los logros de lo "científico", contraponiéndose a la corriente más clásica y ortodoxa que sólo se centra en los argumentos epistémicos y metafísicos, en lo "filosófico". Enfoques, los dos, extremados. Como es el segundo el que ha predominado y predomina en las historias de la filosofía al uso no viene mal una obra como ésta, siempre conscientes de que se sitúa en el otro extremo. El libro, muy bien editado y traducido ahora al castellano por Alianza, se completa con una cronología de la vida de Descartes, la bibliografía correspondiente y un índice de nombres; los capítulos, con numerosas reproducciones de las ediciones originales. (J. de L.)

Ciencia por televisión

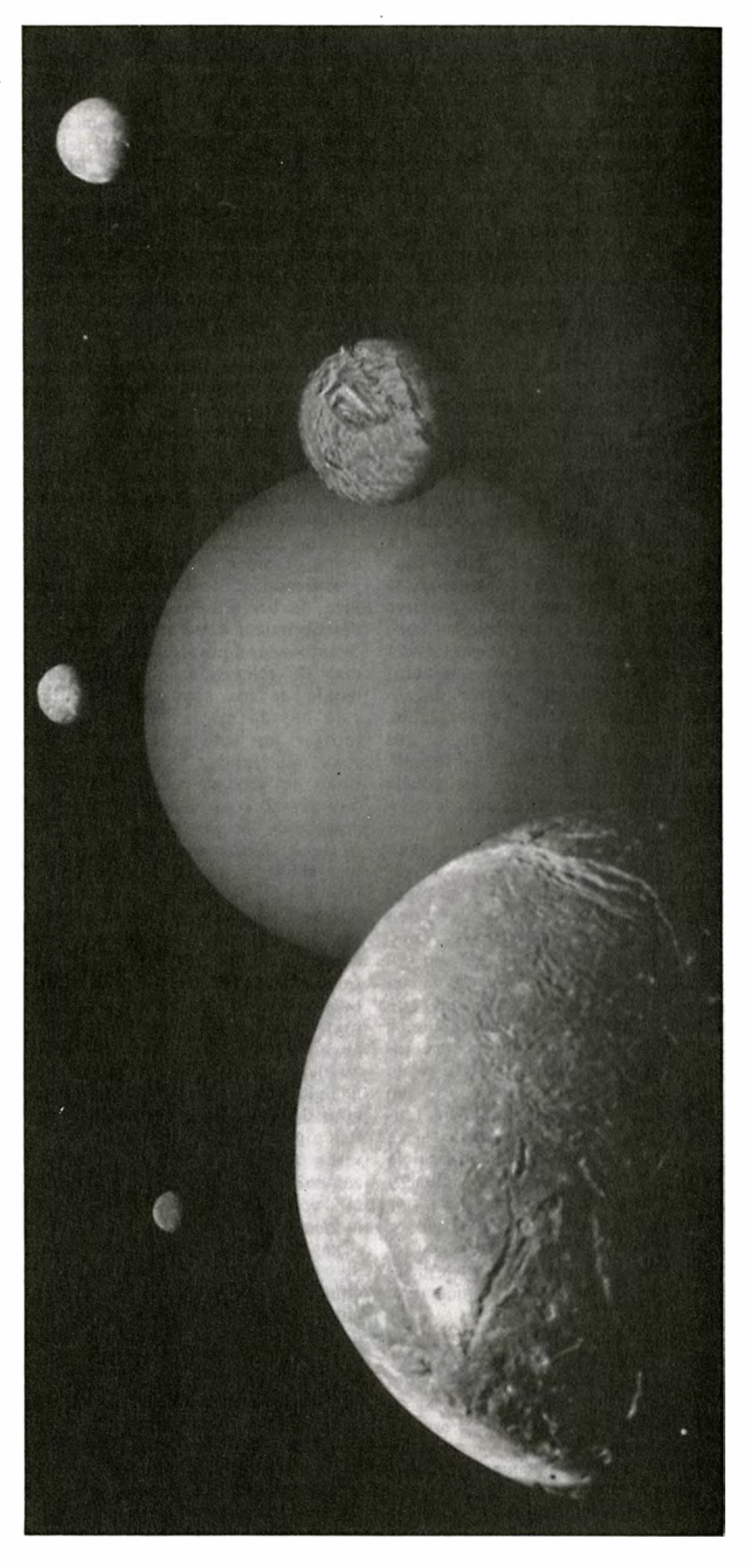
El ejemplo de la astronomía

THE SKY AT NIGHT 10, por Patrick Moore. John Wiley & Sons; Chichester, 1992.

Dicen las malas lenguas que la diferencia fundamental entre un astrónomo aficionado y un astrónomo profesional es que, aunque ambos saben lo mismo, el primero de ellos conoce además las constelaciones. Al menos, en el caso de Patrick Moore esta afirmación es genuinamente cierta, pues pocos lectores serían capaces de descubrir que el señor Moore carece de títulos académicos que avalen sus amplios conocimientos astronómicos.

En su currículum cuenta con el logro sin precedentes de haber mantenido durante 36 años en las pantallas británicas el programa mensual de la BBC1 *The Sky At Night*. Precisamente este libro, el décimo de una serie, recoge textos inspirados en los guiones de 36 programas emitidos durante el período comprendido entre septiembre del año 1988 y julio de 1992.

No es demasiado difícil encontrar



Los cinco satélites principales de Urano, en este montaje creado con las imágenes obtenidas por el Voyager 2. *De arriba abajo: Ariel, Miranda, Titania, Oberón y Umbriel*

temas astrofísicos de actualidad capaces de inspirar guiones atractivos. No en vano nos encontramos en una ciencia en plena ebullición, plagada de interrogantes y fuente continua de descubrimientos y polémicas. El mérito de Patrick Moore es acercarse a los temas astrofísicos con una notable dosis de curiosidad. Moore visita los observatorios y pregunta mucho, se mezcla con los investigadores, vive las noches junto a los astrónomos y comparte con ellos la emoción de los descubrimientos. Luego traduce esa emoción a un lenguaje comprensible y la contagia a sus espectadores y lectores. Su actitud es la del corresponsal de prensa incansable, que se presenta en busca de la noticia en cualquier punto astronómicamente *caliente* del planeta.

Se ha criticado a los divulgadores científicos por hacer fortuna de los descubrimientos ajenos. Puede que sea verdad. Pero es igualmente cierto que muy pocos científicos en activo están dispuestos a bajar a la arena de la divulgación, tal vez para evitar que sus colegas sospechen que cultivan ese campo para ocultar un supuesto fracaso en la investigación. Lo curioso, al mismo tiempo, es que gran cantidad de científicos reconocen que su vocación fue estimulada por un libro o un programa de televisión de tipo divulgativo.

Centrándonos en este libro, ¿consigue plenamente su objetivo divulgador? Probablemente, no. Una pieza literaria puede inspirar un buen guión de televisión, pero es muy arriesgado pretender lo contrario, ya que los guiones van ligados a un complemento audiovisual, del que carece la literatura. Patrick Moore, a pesar del riesgo, intenta esta maniobra con buena pluma, pero con un material gráfico muy pobre. Lo que funciona en la pantalla deja de funcionar en el papel. De poco sirve explicar el método para identificar la estrella Polar en el cielo, diciendo: *se prolonga la línea que pasa por las estrellas Merak y Dubhe de la Osa Mayor*. A buen seguro, en el programa televisivo dicha frase estaba acompañada por un esquema de la constelación.

Esta falta de imágenes de apoyo en muchos libros divulgativos los coloca en clara desventaja a la hora de competir con otros medios de comunicación. Según la British Audio-Visual Society, tendemos a recordar el 10 % de lo que leemos, el 20 % de lo que oímos, el 30 % de lo que vemos y el 50 % de lo que vemos y oímos.

Estamos ante un libro con vocación de ser desordenado, mucho más enfocado hacia un público poco concentrado, como suele ser el espectador de televisión, que para un lector riguroso, que demanda explicaciones más ordenadas y completas. El propio libro, delatando sus orígenes televisivos, practica el *zapping*, saltando de uno a otro, entre temas astronómicos muy distintos.

Patrick Moore no ignora que los hábitos de alimentación cultural de un gran porcentaje de la población están derivando hacia los platos ligeros de comida rápida, en lugar de los menús más elaborados. Este libro, y el programa de televisión que lo inspira, aceptan esta realidad y, continuando con el símil culinario, ofrecen un surtido de platos ligeros, pero, eso sí, preparados por un magnífico cocinero.

Otra forma de entender el evidente desorden de este libro es comprendiendo que estamos ante la crónica de los últimos cuatro años de descubrimientos astronómicos. La ordenación temporal de los programas de televisión, y consiguientemente de los capítulos del libro, está basada en la oportunidad de recoger las noticias a medida que iban ocurriendo. Durante este período se produce el encuentro del *Voyager 2* con Neptuno (1989), el comienzo de las misiones *Magallanes* y *Galileo* hacia Venus y Júpiter (1989), el lanzamiento del satélite *Rosat*, de rayos X, y de la misión *Ulises* hacia los polos del Sol (1990), la puesta en órbita del *Telescopio Espacial Hubble* (1990), el falso descubrimiento de un planeta alrededor de una estrella de neutrones (1991), el descubrimiento de anisotropías en la radiación de fondo del universo. Todo ello ha sido recogido en uno u otro de los capítulos del libro, junto a temas de astrofísica general y reportajes de las visitas a diferentes observatorios astronómicos del mundo, incluyendo el del Roque de los Muchachos, en la isla de la Palma.

Es posible que la lectura de un libro como el que nos ocupa no proporcione al lector un cúmulo de conocimientos formales, pues no se trata de un libro de consulta exhaustivo. Sin embargo, por la vía de contagiar las emociones que sienten los investigadores cuando se acercan a las respuestas a sus preguntas, sí es probable que el lector adquiera unos conocimientos de tipo afectivo, que le hagan amar la ciencia y desear llegar a ser un profesional de la misma. (I. G-R.)

Química e industria

Oriente y Occidente

FROM CAVEMAN TO CHEMIST. CIRCUMSTANCES AND ACHIEVEMENTS, por Hugh W. Salzberg. American Chemical Society; Washington, 1991.

THE STUDY OF CHANGE. CHEMISTRY IN CHINA, 1840-1949, por James Reardon-Anderson. Cambridge University Press; Cambridge, 1991.

THE KAISER'S CHEMISTS. SCIENCE AND MODERNIZATION IN IMPERIAL GERMANY, por Jeffrey Allan Johnson. The University of North Carolina Press; Chapel Hill, 1990.

PHYSICAL CHEMISTRY FROM OSTWALD TO PAULING. THE MAKING OF A SCIENCE IN AMERICA, por John W. Servos. Princeton University Press; Princeton, 1990.

Difícilmente hallaremos una guía mejor para encuadrar la historia de la química de cualquier momento, en sí misma y en su relación con la industria y el avance de la civilización, que la perspectiva que nos ofrece Hugh W. Salzberg en *From Caveman to Chemist. Circumstances and Achievements*. No por otra razón que por la de la claridad. Este manual, que llega hasta los albores del siglo XX, pero que se remonta a los balbuceos de la prehistoria, ahorra el fárrago erudito y las notas carentes de justificación en una obra generalísima para profundizar en el nervio conductor de las ideas fundamentales sobre la composición de la materia y sus transformaciones.

Antes de los griegos, vale decir, del siglo de Pericles, no existía un cañamazo conceptual donde se insertaran las técnicas que con habilidad habían venido desarrollando desde el hombre de las cavernas hasta los especiarios nilotas. El artista de Altamira y el de Lascaux sabían preparar pigmentos para decorar y dar relieve a las escenas de caza. Las mujeres egipcias embellecían el párpado superior con negro de galena en polvo (sulfuro de plomo) y ribeteaban de verde el inferior con polvos de malaquita. Las hembras mesopotámicas preferían, para el mismo propósito, la estibnita (sulfuro de antimonio), que es rojo en ciertas formas y amarillo en otras.

Para los tintes usábanse también productos vegetales y animales, los mismos que perdurarían a lo largo de los siglos y darían esplendor a

determinadas culturas mediterráneas. Así, por ejemplo, la hierba pastel (*Isatis tinctoria* L.), el azafrán (*Crocus sativus* L.), la rubia (*Rubia peregrina* L.) o el molusco *Murex brandaris*, responsable este último de la grandeza de Tiro. En el mismo nivel químico podemos incluir los ungüentos, los perfumes y las bebidas fermentadas.

Para obtener esos productos apenas si se necesitaba más que la materia prima en abundancia. Otros exigían técnicas refinadas, que pronto se domeñaron. Ocurrió así con el jabón, hecho de grasa animal hervida en una solución diluida de potasa (carbonato potásico) y sosa (carbonato sódico), proceso que demandó el dominio de varios pasos logrado a lo largo de miles de años. Otro tanto podría decirse de la cocción de la cerámica, el beneficio de los metales y la industria del vidrio.

A esas técnicas nacidas del tanteo, el azar y la memoria, los griegos aportaron una teoría general de la naturaleza que pervivió durante un milenio largo. En su trayectoria, fueron apareciendo nuevos conceptos y nuevas sustancias, que requirieran, en los grandes alquimistas árabes (Jabir, al-Kindi, al-Razi y Avicena), la ideación de criterios de jerarquización sistemática. No se apartaron tampoco del patrón hilemorfista aristotélico los renacentistas, ni siquiera en sus escarceos democríteos o atomistas.

Con la revolución científica emergen los precursores de la química moderna. Angelo Sala (1576-1637) arruinó, a la vez, la teoría de los cuatro elementos y el principio triádico de los paracelsistas, con un sobrio experimento: pesó cierta cantidad de cobre, lo disolvió en ácido sulfúrico concentrado, añadió agua y obtuvo sulfato de cobre. Ese producto era idéntico al azul de vitriolo de la naturaleza. Lo convirtió luego en óxido de cobre. Por último, redujo el óxido a cobre (quizá con carbón vegetal). Pesó el cobre reducido y lo comparó con el peso de origen: era el mismo. No habían mediado transmutaciones, sino meras reacciones. De parejo alcance fue el descubrimiento de los gases por Johan Baptista van Helmont (1579-1644).

La hipótesis del flogisto anuncia, por negación, el verdadero orto de la química. Johann Becher (1635-1682), médico de Maguncia, resumió en cinco los últimos constituyentes de la materia: aire, agua y tres sólidos diferentes que correspondían a tres respuestas distintas en un proceso de combustión; eran éstos la "tierra vítrea" (o residuo inerte, vidrioso y resistente al fuego), la "tierra grasa" (o materia combustible, lo que se quemaba) y la "tierra mercurial" (o fluido volátil, lo que se destilaba). Unos años más tarde, Georg Ernst Stahl (1660-1734), discípulo suyo, reformulaba los principios y cambió el nombre de tierra pingüe por flogisto, elemento fantasmagórico (de peso negativo) sobre cuyas ruinas levantaría Antoine Lavoisier (1743-1794) la química que conocemos. Organizó éste la información dispersa (de Boyle a Black) en un sistema radicalmente nuevo, consideró últimos o indivisibles los elementos químicos, clasificó ácidos, bases, sales y óxidos, de acuerdo con su composición y reacciones acometidas, creó una teoría unificada, con separación de química orgánica de la inorgánica e ideó una herramienta poderosísima: la nomenclatura química. La teoría de los enlaces, la búsqueda de pesos atómicos y moleculares, la ley de las proporciones definidas, la de las proporciones múltiples y la de las proporciones recíprocas o la tabla periódica, en fin, cuanto se considera básico en esta área sigue el surco marcado por Lavoisier.

Calcada repetición de lo ocurrido en el siglo XVII, cuando los jesuitas introdujeron en China la astronomía y matemática occidentales, serán también los misioneros cristianos quienes llevarán allí, mediada la centuria pasada, la nueva química, ciencia y arte que, a la postre, abrirían a la modernidad un país feudal y herméticamente cerrado. Esa transformación se gestó a lo largo de un siglo, objeto de investigación de James Reardon-Anderson en *The Study of Change. Chemistry in China, 1840-1949.*

No hubo, en China, continuidad entre el ejercicio de la alquimia y la asimilación de la química. En ese corte sin puentes intervinieron dos figuras ajenas al mundo académico oficial, secularmente de espaldas a las ciencias experimentales y la técnica: Hsü Shou (1818-1882) y John Fryer (1839-1928). Shou, que había fracasado en su intento de ingreso en la administración civil, descubrió un mundo inédito en la lectura de la *Filosofía natural de la Historia Natural*, un manual generalísimo de la ciencia de mediados del siglo XIX escrito por Benjamin Hobson, que recogía breves nociones de química. Le llamó la atención, sobre todo, la descripción de la electricidad. Y se dispuso a repetir los sencillos experimentos allí relatados.





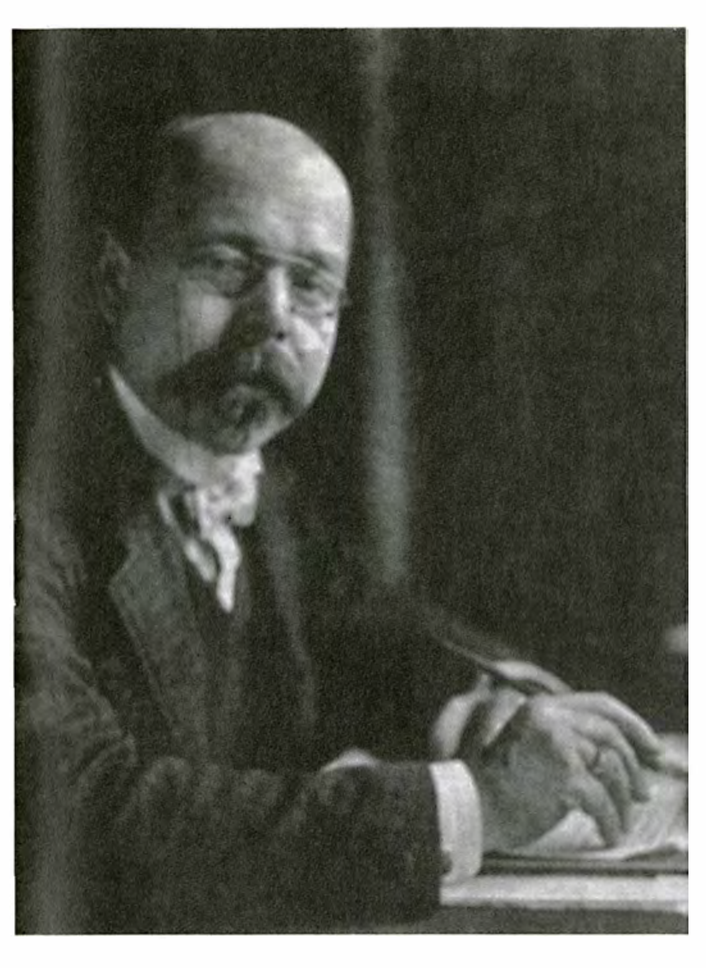
Las guerras del opio habían demostrado el enorme retraso de China en ingeniería naval y armamentos. País eminentemente agrícola, andaba también muy a la zaga en desarrollo industrial y comunicaciones. La propia medicina y cirugía pervivían aletargadas. Para paliar ese desfase se crearon en las ciudades de Pekín, Shangai y Cantón grupos de traductores dedicados a verter manuales ingleses y franceses. Por lo que a la química se refiere, el núcleo principal se formó en el arsenal de Kiangnan, donde colaboraron Shou y Fryer. Tomaron buena nota de la experiencia anterior y copiaron el método jesuítico: un extranjero dictaba el texto, frase a frase, en chino hablado y su socio oriental lo escribía puliendo el estilo; discutían en los casos controvertidos el término exacto. Reproducíanse luego diagramas y esquemas. Acertaron, en buena medida, en la acuñación de los elementos, en la simbolización y en la representación de las fórmulas.

El tránsito hacia la modernización, o período de interregno, que en fechas viene a durar de 1895 a 1927, trae a la memoria la situación española de la segunda mitad del XVII, cuando los novatores alentaron la entrada de las nuevas corrientes científicas en nuestro país. El aprecio de la experimentación, todavía mera ponderación retórica, va calando en grupos selectos formados por intelectuales nacidos en torno a la década de los ochenta y graduados en el extranjero. Traducen no sólo manuales, sino también artículos técnicos y crean el fermento de sociedades científicas, con una revista oficial, *K'o-hsüeh*, multidisciplinar y de enorme influencia entre 1915 y 1949. (La edición china de *Scientific American*, del mismo título, nació con el propósito de tomar su relevo para la regeneración del país.)

Por lo que a la química concierne, la iniciativa privada vio en su cultivo el medio idóneo para impulsar el desarrollo de la industria y la agricultura. La universidad, principalmente desde la instauración de la república en 1912, abrió muy pronto laboratorios de química. Se adelantó la Universidad Nacional del Sureste, donde enseñaba Wang Chin, procedente de la de Leigh y considerado fundador de la profesión en China. Con la frecuente ayuda de la Fundación Rockefeller, los centros establecidos por los misioneros aportaron lo más granado de los químicos de ese período: William Adolph, Stanley Wilson, Earl Wilson y muchos más, doctorados en América y Europa, quienes realizaron investigación aplicada sobre curtidos, nutrición, tinturas y otros campos de interés local.

Los químicos del interregno se inician repitiendo los experimentos diseñados en los libros occidentales, al tiempo que va creándose desde los años veinte cierta masa crítica que permitirá el despegue de la figura imponente de Wu Hsien (1893-1959), bioquímico formado en el Instituto de Tecnología de Massachusetts y en la Universidad de Harvard, a quien el mundo le debe un método rápido de análisis de la sangre y de ciertos metabolitos y, su país, las bases de la medicina moderna y la reforma dietética. (El advenimiento del totalitarismo socialista en China le obligó a emigrar en 1949.) Por su parte, la industria química, siempre de la mano de expertos extranjeros, comenzaba también a implantarse en el norte (Fan Hsü-tung y las fábricas de carbonato sódico y sulfato amónico) y en el sur (Wu Yün-ch'u y la industria del glutamato monosódico).

El apogeo de la química china llega, en 1927, con la subida al poder del Kuomintang, un partido de corte



Emil Fischer, Wilhelm Ostwald y Walter Nernst pusieron las bases de la química física en el primer tercio de nuestro siglo.

liberal que trajo el orden perdido desde la caída de la dinastía Ch'ing. La década de Nanking, como también se la conoce, pues se prolonga hasta la guerra con los japoneses (1937), coincide con la leva de los químicos de la segunda generación, la de Chuang Chang-kong y Sah Pen-t'ieh, formado el primero en la Universidad de Chicago y en la de Wisconsin el segundo. Copan las universidades, establecen sociedades y prosiguen la labor iniciada durante su doctorado en centros europeos y americanos. Abarcan todas las ramas de la química, desde la orgánica a la física, y roturan líneas básicas o ayudan al despegue de la industria nacional (gasolinas sintéticas). Reforman la nomenclatura y publican, o son citados, en el exterior por trabajos fundamentales sobre puntos de fusión o agua pesada. Pero esos años de esplendor quedan cortados, primero, con la guerra y, luego, con el exilio o la postergación que impone Mao.

La otra cara de la moneda la presenta Alemania. Desde el primer tercio del siglo XIX se había convertido en motor de la química occidental. Lejos de decaer, al doblar la centuria, se somete a una regeneración desde dentro, que transformará el país en primera potencia del mundo. Sin materias primas, confía en la inteligencia y en la industriosidad de su gente, y ve en la química, como diría Fischer, la "tierra de las posibilidades ilimitadas". Todo el tejido social —la universidad, la industria y la administración— se siente implicado en la conquista de ese continente. Es el momento en que el dueño de la fábrica, pensemos en Werner Siemens, es, al propio tiempo, investigador e inventor de la manufactura. De ese ambiente y del esfuerzo empeñado en la creación de un Instituto Imperial de Química trata la obra, que gana con el doblar de las páginas, de Jeffrey Allan Johnson, *The Kaiser's Chemists*.

El renacimiento de la química alemana se debe a Emil Fischer, Wilhelm Ostwald y Walther Nernst. Fischer representa el mundo de la síntesis orgánica, que establece puentes entre la investigación básica y la aplicada. Ostwald y Nernst elevan el nivel teórico con su dedicación a la química física y la electroquímica. Pero no se quedan en el terreno de la matematización de las soluciones, iónicas o moleculares. Trabajan en la catálisis que acelera los procesos de fabricación y hacen progresar la química analítica. Paralelamente, cambia la política empresarial con la creación de la Triple Alianza, que aúna las principales firmas en un mismo fin, y sufre un vuelco la estructura del laboratorio unipersonal, que se subdivide en función de las diversas tareas y competencias. Si la ocasión lo demanda, es la nación en pleno la que responde a la necesidad: ocurrió así con los nitratos y la guerra de los bóer. Alemania dependía de su importación para la fabricación de fertilizantes y explosivos. Ante el temor de su merma, Ostwald crea un método de oxidación del amonio para producir nitratos; de resultas de su investigación en ese campo, Nernst descubre su teorema del calor (el llamado Tercer Principio de la Termodinámica). Fritz Haber se incorpora a la labor y obtiene la primera síntesis industrial de amonio. BASF y la Triple Alianza ponen el dinero y los medios.

El sueño de Fischer, la creación de un Instituto Imperial de Química que modernizara la nación y acomodara la marcha de la ciencia al paso de la industria (lo que no se obtenía con el movimiento lentísimo de la universidad), cristalizó en la erección de un instituto de química, otro de química física y un tercero del carbón, los tres antes de la primera guerra mundial. Siguieron otros (el de biología, por ejemplo). Desde entonces, Dahlem (suerte de ciudadela prusiana del saber en los tiempos de Guillermo II y la república de Weimar) constituye un punto de inflexión en la historia de la ciencia, no sólo de la química.

Fischer no quería que su país quedara atrás ante quien intuía iba a protagonizar el liderazgo de la química del futuro: los Estados Unidos de Norteamérica, cuyo desenvolvimiento es objeto de estudio por parte de John W. Servos en *Physical Chemistry from Ostwald to Pauling. The Making of a Science in America*. Las bases, sin embargo, de la disciplina que a comienzos de siglo iba a tener la importancia que adquirirían luego la mecánica cuántica y la biología molecular, serían europeas.

En Jacobus Henricus vant't Hoff, Svante Arrhenius y Wilhelm Ostwald se reconocen los fundadores de la química física. De Ostwald ya hemos dicho el cambio que pide, de las sustancias reaccionantes a la reacción en sí misma, con la aplicación de utillaje tomado de la física y soporte matemático, aunque sólo sean unas nociones elementales de cálculo diferencial e integral. Van't Hoff no sólo idea la estructura tridimensional del carbono para explicar su afinidad y actividad óptica, sino que enhebra en un cuadro teórico riguroso tres conceptos fundamentales de la nueva ciencia: la ley de acción de masas, la condición de equilibrio de una reacción y la medición de las constantes de equilibrio. Arrhenius, por su parte, trabaja en la conductividad de las soluciones y su relación con la concentración de las mismas. Servos articula el desarrollo de esas ideas seminales en la creación de los centros de excelencia norteamericanos: Cornell, Chicago, MIT, Caltech... y, a la postre, en el poderío industrial del país. (L. A.)

Apuntes

En un libro delicioso y didáctico, *La célula viva*, Chistian de Duve describe con vivos colores la función imprescindible y continua de los controladores de calidad en la ejecución exacta y a tiempo de los procesos de síntesis y degradación, de los relativos a la comunicación, etcétera. Se ha propuesto ahora la existencia de un sistema entero de control de calidad en el retículo endoplasmático; estaría contituido por chaperonas y enzimas del plegamiento y aseguraría la operación cabal de las proteínas secretoras, además de regular su transporte. Entre esas chaperonas --o proteínas "carabina"-- destacaría la calnexina, que reconocería las glicoproteínas con un plegamiento inacabado.

El remedio, viejo aviso, puede ser peor que la enfermedad. El análisis valorativo de tres de los hidrocarburos que se han introducido, para sustituir a los vilipendiados halocarburos responsables de la merma del ozono estratosférico, atrapan más radiación infrarroja, molécula a molécula, que los compuestos a remplazar.

La paleontología ha recuperado una forma de transición entre miriápodos e insectos. *Kalbarria brimmellae*, así han bautizado al animalillo, medía unos 120 milímetros de longitud, tenía la cabeza apenas distinguible de la región torácica y ésta se dividía en monosegmentos, diplosegmentos y triposegmentos. El nuevo artrópodo hallado pertenecía a los euticarcinoideos, cuyos ejemplares conocidos no iban más allá del Carbonífero, en tanto que *Kalbarria* es del Silúrico, lo que lo retrotrae hasta hace 420 millones de años. En esa antigüedad se apoya la hipótesis de que los insectos procedían de un antepasado miriapodiforme a través de formas con hechuras de euticarcionoideo.

¿A qué se debe el colapso repentino de civilizaciones prósperas? En algún caso el hundimiento ha obedecido a grandes trastornos climáticos. Ocurrió así con la caída de Subir, pueblo rico de las llanuras sirias de Habur que conoció su apogeo desde el 2600 hasta el 2200 a.C. La actividad volcánica y la sequía subsiguiente acabaron con las ricas cosechas de cebada y trigo y con la cabaña de ovejas de los pueblos acádicos del norte mesopotámico.

Las aberraciones, naturales o provocadas, han constituido una de las bases del progreso de la genética desde los albores de esta ciencia. En tal contexto, se empieza a sospechar de la intervención del colágeno en la regulación de la diferenciación de las células de la musculatura lisa, tras lo observado en determinados pacientes con síndrome de Alport. Esta especie morbosa ligada al sexo es un trastorno que se caracteriza por deleciones en el gen de cierto tipo de colágeno. Dentro de ese grupo de afectados, un subconjunto hereda también tumores benignos en la musculatura lisa; se ha visto que estos individuos portan deleciones que pinzan dos genes de colágeno, uno ya conocido y el otro sin identificar.

No hay mes sin que aparezca en el estante de las novedades editoriales algún libro sobre el caos. En su obra reciente "La entropía y la flauta mágica", Harold J. Morowitz evoca la historia reciente de esa moda:" El término 'caos' entró en la ciencia por una vía inverosímil. La primera observación registrada de una ameba se la debemos a Risel von Rosenblot. Ocurría en 1755. En la décima edición de su *Systema Naturae* Linneo impuso el nombre de *Volvox chaos* al protozoo de marras. En otra edición posterior lo trocó por el de *Chaos protheus*. Cualquiera que haya pegado el ojo al ocular del microscopio para ver su desenvoltura estará de acuerdo en invocar al caos para un nombre de género o especie. En una de esas inacabadas disputas en que se enzarzan los taxónomos se sigue debatiendo qué es mejor llamarla: *Volvox chaos* o *Chaos chaos*. Sistemáticos aparte, la poesía aconsejaría optar por la segunda denominación."

Número extraordinario y monográfico de noviembre

SISTEMA INMUNITARIO

Nada hay más íntimo en nosotros que el sistema inmunitario.
Nos define a cada uno y nos defiende. Sus trastornos provocan las enfermedades
y nos llevan a la muerte. Por eso, su estudio constituye
la aproximación fundamental y unitaria de la biología humana.



- **INMUNIDAD**
- **RECHAZO DE TRASPLANTES**
- **LUCHA CONTRA EL CANCER**
- **SIDA**
- **ALERGIA**
- **INFECCIONES**
- **ESCLEROSIS MULTIPLE**
- **ARTRITIS REUMATOIDE**
- **VACUNAS**
- **TERAPIAS INMUNITARIAS**

Cuanto se ha avanzado en ese campo, dominio conquistado por la medicina
de nuestro siglo, lo encontrará el lector en este ejemplar de

INVESTIGACION Y CIENCIA

que rastrea la evolución, desarrollo y funcionamiento del sistema,
examina su intervención en la destrucción de células tumorales y toxinas, explora
los nuevos tratamientos contra las alergias y ahonda en el mundo nebuloso
de las enfermedades autoinmunitarias.